

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**ROGER ALVES DE OLIVEIRA**

**AFUNDAMENTOS DE TENSÃO EM  
CONSUMIDORES INDUSTRIAIS:  
UMA ANÁLISE BASEADA NO FATOR DE IMPACTO  
E NA SEVERIDADE DOS EVENTOS  
CONSIDERANDO OS EFEITOS DE FALTAS  
ELÉTRICAS EM SISTEMAS DE POTÊNCIA**

Porto Alegre  
2018

**ROGER ALVES DE OLIVEIRA**

**AFUNDAMENTOS DE TENSÃO EM  
CONSUMIDORES INDUSTRIAIS:  
UMA ANÁLISE BASEADA NO FATOR DE IMPACTO  
E NA SEVERIDADE DOS EVENTOS  
CONSIDERANDO OS EFEITOS DE FALTAS  
ELÉTRICAS EM SISTEMAS DE POTÊNCIA**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.  
Área de concentração: Energia

**ORIENTADOR:** Prof. Dr. Roberto Chouhy Leborgne

**CO-ORIENTADOR:** Prof. Dr. Renato Gonçalves Ferraz

Porto Alegre  
2018

**ROGER ALVES DE OLIVEIRA**

**AFUNDAMENTOS DE TENSÃO EM  
CONSUMIDORES INDUSTRIAIS:  
UMA ANÁLISE BASEADA NO FATOR DE IMPACTO  
E NA SEVERIDADE DOS EVENTOS  
CONSIDERANDO OS EFEITOS DE FALTAS  
ELÉTRICAS EM SISTEMAS DE POTÊNCIA**

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Orientador: \_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Roberto Chouhy Leborgne, UFRGS  
Doutor pela Chalmers University of Technology – Göteborg,  
Suécia

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Daniel da Silva Gazzana, UFRGS  
Doutor pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Porto Alegre, Brasil

Profa. Dra. Mariana Resener, UFRGS  
Doutor pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Porto Alegre, Brasil

Prof. Dr. José Maria de Carvalho Filho, UNIFEI  
Doutor pela Universidade Federal de Itajubá – Itajubá, Brasil

Coordenador do PPGEE: \_\_\_\_\_  
Prof. Dr. João Manoel Gomes da Silva Junior

Porto Alegre, setembro de 2018.

## DEDICATÓRIA

Dedico essa dissertação à minha mãe Iracilda Alves de Oliveira e ao meu pai Aroldo Rodrigues de Oliveira (*in memoriam*), que com muito carinho e apoio, não mediram esforços para que eu chegasse até essa etapa na minha vida.

## **AGRADECIMENTOS**

À minha mãe Iracilda Alves de Oliveira, por todo apoio e incentivo recebido para concluir o mestrado.

Ao meu irmão Aroldo Rodrigues Junior e ao meu sobrinho Nicolas Carpinter de Oliveira, pelos momentos compartilhados em família.

Aos amigos Anita Carrasco, Carolina Schneider, Jason de la Cruz, Mabile Terra, Marcel Lettnin, Lugiane Alves, Raul Steinmetz, Rodrigo Roig, pelo apoio em momentos difíceis e motivação a retomar o mestrado.

Ao Professor Roberto Chouhy Leborgne, pela disponibilidade na orientação dessa dissertação, pelas oportunidades oferecidas e pela convivência de trabalho nestes dois anos. Bem como, pelos ensinamentos nas disciplinas de Análise de Sistemas de Energia e Qualidade de Energia.

Ao Professor Renato Gonçalves Ferraz, pela co-orientação e pelas contribuições à execução deste trabalho.

Aos colegas do PPGEE e do LASEP pelos momentos compartilhados e oportunidades de trabalhos conjuntos. Um agradecimento especial à Bibiana Petry Ferraz e a Ruth Agustini, por toda ajuda na elaboração da pesquisa. Bem como, aos amigos feitos neste período e que tanto me motivaram nesta etapa, especialmente à Ana Paula Zannata, Ary Santana e Gustavo Baierle.

À Coordenação de Aperfeiçoamento Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo suporte financeiro.

## RESUMO

O presente trabalho trata da análise comparativa das padronizações IEEE 1564 e Módulo 8 dos Procedimentos de Distribuição da Agência Nacional de Regulação Elétrica, dentro do escopo de afundamentos de tensão. Para tal comparação, é realizado um estudo de caso de monitoramento em um consumidor industrial sensível ao distúrbio de qualidade de energia durante 24 meses. Adicionalmente, visto que as principais causas dos afundamentos são as faltas elétricas do sistema ao qual a indústria está inserida, são analisadas as relações entre ambos os eventos. A partir da simultaneidade dessas contingências, um único conjunto de dados foi obtido via MATLAB<sup>®</sup>, o qual permitiu realizar o agrupamento das variáveis com o algoritmo *K-means* através do programa WEKA. Os eventos simultâneos também foram convenientes para a validação de um modelo de simulação no programa ANAFAS. Os resultados obtidos com a aplicação de tal metodologia permitiram determinar o impacto dos eventos, analisar a área de vulnerabilidade, propor mitigações no SEP em estudo, bem como validar um modelo de simulação de afundamentos com erro relativo menor do que 10% para mais de 70% dos casos.

**Palavras-chave:** Qualidade de Energia, Afundamentos de tensão, Faltas Elétricas, IEEE 1564, PRODIST.

## **ABSTRACT**

The present work deals with a comparative analysis of IEEE 1564 standardization and Module 8 of Distribution Procedures of the Brazilian Agency of Electrical Regulation, within the scope of voltage sags. For such comparison, a case study of monitoring is performed on an industrial consumer sensitive to the disturbance during 24 months. Additionally, since the main causes of the voltage sags are the electrical faults of the system to which the industry is inserted, the relations between both events are analyzed. From the simultaneity of these contingencies, a unique set of data was obtained through MATLAB<sup>®</sup>, which allowed the clustering of variables with K-means algorithm through WEKA software. Simultaneous events were also convenient for the validation of a simulation model in ANAFAS software. The results obtained with the application of such methodology allowed to know the impact of the events, to analyze the vulnerability area, to propose mitigations in the power system under study, as well as to validate a simulation model of sags with relative error less than 10 % to more than 70 % of cases.

**Keywords: Power quality, Voltage sags, Eletrical faults, IEEE 1564, PRODIST .**

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1:	Etapas para o desenvolvimento da pesquisa. . . . .	22
Figura 2:	Número de publicações com o tema de afundamentos de tensão entre os anos de 1990 e 2015. . . . .	25
Figura 3:	Curva CBEMA. . . . .	31
Figura 4:	Curva ITIC. . . . .	32
Figura 5:	Curva de suportabilidade para equipamentos semicondutores Semi F47	33
Figura 6:	Exemplo de área de vulnerabilidade para um consumidor instalado na barra k. . . . .	34
Figura 7:	Linha do tempo das mais relevantes padronizações desenvolvidas. . .	37
Figura 8:	Metodologia proposta para a quantificação dos afundamentos e comparação das padronizações IEEE 1564 e Módulo 8 do PRODIST. . . .	45
Figura 9:	Estratificação pela curva de sensibilidade SEMI F47. . . . .	46
Figura 10:	Proposição para agrupamento das principais variáveis de influência, para levantamento da área de vulnerabilidade e para recomendações de mitigação. . . . .	51
Figura 11:	Exemplo de execução do algoritmo de K-Means. . . . .	55
Figura 12:	Diagrama unifilar simplificado do SEP em análise com a conexão do consumidor sensível. . . . .	59
Figura 13:	Número de eventos nos três níveis de tensão de acordo com a IEEE 1564 e módulo 8 do PRODIST. . . . .	60
Figura 14:	Resultados da monitoração nos três níveis de tensão. . . . .	63
Figura 15:	Porcentagem acumulada da magnitude dos afundamentos nos três níveis de tensão. . . . .	65

Figura 16:	Porcentagem acumulada da duração dos afundamentos nos três níveis de tensão. . . . .	66
Figura 17:	Número de eventos severos x número de eventos nas regiões E e F nos três níveis de tensão. . . . .	67
Figura 18:	Severidade e Fator de Impacto mensal nos três níveis de tensão. . . .	68
Figura 19:	Número de Faltas x Número de Afundamentos entre os meses 4 e 21.	69
Figura 20:	Afundamentos de tensão detectados nos três níveis de tensão simultâneos às faltas elétricas na barra 17 com atuação da proteção de retaguarda na LT 17-14, LT 17-15, LT 17-16 e LT 17-18. . . . .	71
Figura 21:	Afundamento de tensão detectado em 230 kV simultâneo à falta elétrica na LT 1-2. . . . .	72
Figura 22:	Afundamentos de tensão detectados nos três níveis de tensão simultâneos à falta elétrica na LT 16-12. . . . .	73
Figura 23:	Visualização das Características dos Afundamentos de Tensão versus Severidade. . . . .	74
Figura 24:	Visualização das Características das Faltas Elétricas versus Severidade.	75
Figura 25:	Agrupamento para os equipamentos. . . . .	76
Figura 26:	Agrupamento geral. . . . .	77
Figura 27:	Área de vulnerabilidade de acordo com a magnitude dos afundamentos de tensão. . . . .	78
Figura 28:	Área de vulnerabilidade de acordo com as classes de sensibilidade definidas no módulo 8 do PRODIST. . . . .	79
Figura 29:	Área de vulnerabilidade de acordo com o indicador de severidade. . .	80
Figura 30:	Causas e localização das faltas na linha de transmissão 17-16. . . . .	81
Figura 31:	Causa e localização das faltas na linha de transmissão 17-15. . . . .	81
Figura 32:	Causa e localização das faltas na linha de transmissão 16-12. . . . .	82
Figura 33:	Causa e localização das faltas na linha de transmissão 17-18. . . . .	82
Figura 34:	Causa e localização das faltas na linha de transmissão 3-11. . . . .	83
Figura 35:	Causa e localização das faltas na linha de transmissão 3-12. . . . .	83
Figura 36:	Causa e localização das faltas na linha de transmissão 12-11. . . . .	84
Figura 37:	Causa das Faltas na barra 11 . . . . .	84
Figura 38:	Causa das Faltas na barra 17 . . . . .	85

Figura 39:	Comparação da magnitude simulada com a magnitude monitorada . . . . .	87
Figura 40:	Erros relativos da magnitude simulada . . . . .	88
Figura 41:	Erros relativos da simulação para cada tipo de causa . . . . .	89

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1:	Consumo por Classe em GWh . . . . .	18
Tabela 2:	. . . . .	19
Tabela 3:	Classificação das VTCDs de acordo com os Procedimentos de Rede. .	27
Tabela 4:	Classificação das VTCDs de acordo com os Procedimentos de Distribuição. . . . .	28
Tabela 5:	Tolerância de tensão para os principais equipamentos industriais. . . .	33
Tabela 6:	Comparação de trabalhos que contemplam as padronizações IEEE 1564 e/ou Prodist. . . . .	41
Tabela 7:	Comparação de trabalhos que contemplam a relação de faltas elétricas com afundamentos de tensão. . . . .	42
Tabela 8:	Estratificação em regiões de sensibilidade proposta pela ANEEL. . .	47
Tabela 9:	Cálculo da severidade do afundamento de tensão conforme a curva semi F47. . . . .	48
Tabela 10:	Ponderação para as regiões de sensibilidade e valores de $FI_{base}$ para diferentes níveis de tensão. . . . .	49
Tabela 11:	Categorização das variáveis de faltas e afundamentos. . . . .	53
Tabela 12:	Eventos com diferente quantificação pelas padronizações. . . . .	62
Tabela 13:	Diferença na estratificação mensal de ambas Padronizações - Nível de 13,8 kV . . . . .	64
Tabela 14:	Diferença na estratificação mensal de ambas Padronizações - Nível de 34,5 kV . . . . .	65
Tabela 15:	Diferença na estratificação mensal de ambas Padronizações - Nível de 230 kV . . . . .	66

Tabela 16:	Porcentagem de relação do número de afundamentos e de faltas elétricas para cada nível de tensão. . . . .	70
Tabela 17:	Resistência de falta . . . . .	88
A-Tabela 1:	Eventos registrados pelo monitoramento nos três níveis de tensão. . .	98
B-Tabela 1:	Estratificação e Quantificação Mensal de ambas Padronizações - Nível de 13,8 kV . . . . .	108
B-Tabela 2:	Estratificação e Quantificação Mensal de ambas Padronizações - Nível de 34,5 kV . . . . .	109
B-Tabela 3:	Estratificação e Quantificação Mensal de ambas Padronizações - Nível de 230 kV . . . . .	110
C-Tabela 1:	Lista dos Afundamentos de Tensão Relacionados com as Faltas Elétricas . . . . .	111

## LISTA DE ABREVIATURAS

ABRACE	Associação Brasileira de Grandes Consumidores Industriais e de Consumidores Livres
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CBEMA	<i>Computer and Business Equipment Manufacturers' Association</i>
CP	Consulta Pública
DVR	<i>Dynamic Voltage Restorer</i>
EP	Eletrônica de Potência
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
FI	Fator de Impacto
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
ITI	<i>Information Technology Industry Council</i>
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica
QEE	Qualidade de Energia Elétrica
RMS	<i>Root Mean Square</i>
TP	Transformador de Potencial
UPS	<i>Uninterruptable Power Supply</i>
VTCD	Varição de Tensão de Curta Duração

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	16
1.1	Relevância do Tema	17
1.2	Objetivos e Contribuição da Dissertação	20
1.3	Desenvolvimento da Pesquisa	21
1.4	Estrutura da Dissertação	23
<b>2</b>	<b>AFUNDAMENTOS DE TENSÃO E RELAÇÕES COM FALTAS ELÉ- TRICAS</b>	24
2.1	Considerações Iniciais	24
2.2	Conceitos e Definições	26
2.2.1	Caracterização dos Afundamentos	27
2.2.2	Variáveis de Influência	30
2.2.3	Efeitos dos Afundamentos de Tensão e Curvas de Sensibilidade	30
2.2.4	Área de Vulnerabilidade	33
2.2.5	Mitigação de Afundamentos de Tensão	34
2.3	Principais Trabalhos Existentes: Estado da Arte	36
2.3.1	Principais Desenvolvimentos Relacionados às Padronizações IEEE 1564 e Prodist Módulo 8	36
2.3.2	Principais Trabalhos de Correlação entre Faltas e Afundamentos	39
2.3.3	Observações e Ponderações sobre as Propostas Existentes	40
2.4	Considerações Finais	42
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA PROPOSTA</b>	43
3.1	Considerações Iniciais	43

<b>3.2</b>	<b>Proposição para Quantificação dos Afundamentos de Tensão e Comparação das Padronizações IEEE 1564 e PRODIST Módulo 8</b>	44
3.2.1	Entrada de Dados	44
3.2.2	Agregação de Fases	44
3.2.3	Agregação de Eventos	45
3.2.4	Estratificação	46
3.2.5	Avaliação dos Afundamentos de Tensão	47
3.2.6	Análise Comparativa dos Indicadores	49
<b>3.3</b>	<b>Proposição para Agrupamento das Principais Variáveis de Influência</b>	50
3.3.1	Entrada de Dados	52
3.3.2	Pré-processamento	52
3.3.3	Simultaneidade dos Eventos	52
3.3.4	Mineração de Dados	53
3.3.5	Levantamento da Área de Vulnerabilidade	55
3.3.6	Recomendações de Mitigação	55
<b>3.4</b>	<b>Proposição para Validação de um Modelo de Simulação</b>	56
<b>3.5</b>	<b>Considerações Finais</b>	56
<b>4</b>	<b>ESTUDO DE CASO E RESULTADOS</b>	58
<b>4.1</b>	<b>Considerações Iniciais</b>	58
<b>4.2</b>	<b>Descrição da Indústria e do SEP</b>	58
<b>4.3</b>	<b>Resultados</b>	60
4.3.1	Quantificação dos Afundamentos e Comparação das Padronizações IEEE 1564 e Módulo 8 do Prodist	60
4.3.2	Análise das Variáveis de Influência de Faltas nos Afundamentos de Tensão	69
4.3.3	Levantamento da Área de Vulnerabilidade de Afundamentos de Tensão no SEP	77
4.3.4	Recomendações de Mitigação	79
<b>4.4</b>	<b>Validação de um modelo de simulação</b>	87
<b>4.5</b>	<b>Análise Geral</b>	89
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS</b>	92
<b>5.1</b>	<b>Conclusões</b>	92

<b>5.2</b>	<b>Sugestões para Trabalhos Futuros</b>	<b>93</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>95</b>
<b>APÊNDICE A</b>	<b>REGISTROS DA MONITORAÇÃO DOS AFUNDAMENTOS DE TENSÃO</b>	<b>98</b>
<b>APÊNDICE B</b>	<b>RESULTADOS DA QUANTIFICAÇÃO MENSAL DE AFUNDAMENTOS DE TENSÃO</b>	<b>108</b>
<b>APÊNDICE C</b>	<b>LISTA DOS AFUNDAMENTOS DE TENSÃO RELACIONADOS COM AS FALTAS ELÉTRICAS</b>	<b>111</b>
<b>APÊNDICE D</b>	<b>RESULTADOS DOS AGRUPAMENTOS DOS AFUNDAMENTOS DE TENSÃO E FALTAS ELÉTRICAS</b>	<b>116</b>
<b>ANEXO A</b>	<b>DADOS DO SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA</b>	<b>121</b>

# 1 INTRODUÇÃO

Considera-se que, dentre os fatores predominantes na economia mundial, a energia elétrica possui uma destacada importância. Assim, sua qualidade é uma necessidade para diferentes grupos de consumidores, em especial os industriais. Nesta categoria de consumo, o uso de modernos dispositivos eletrônicos de potência tem se intensificado devido à eficiência, facilidade de utilização e confiabilidade. Porém, esta tecnologia apresenta sensibilidade a variações de tensão, corrente e frequência da energia fornecida, o que pode resultar em falhas ou má operação de equipamentos.

Assim sendo, a Qualidade de Energia Elétrica (QEE) tornou-se uma preocupação não só das concessionárias, mas também dos consumidores finais. Por conseguinte, é crescente a exigência dos consumidores pela melhoria da qualidade dos serviços prestados e relacionados à energia elétrica, o que torna necessária uma pronta atuação e constante acompanhamento dos órgãos reguladores.

Problemas de QEE são relativamente novos: anos atrás isso era um problema enfrentado somente em centrais elétricas e fornos a arco. Neste enquadramento, a comunidade acadêmica de engenharia elétrica começou a lidar com análise, diagnósticos e solução destes problemas (BAGGINI, 2008). A QEE tornou-se um assunto importante como área de estudo, na qual as pesquisas fornecem embasamento para os diversos setores envolvidos com a regulação, operação, fornecimento e consumo da energia elétrica. Bem como, o desenvolvimento de técnicas mitigadoras para problemas de QEE também estão se tornando relevantes (SINGH; CHANDRA; AL-HADDAD, 2014).

Dentre todos os distúrbios de QEE, o afundamento de tensão é o que, atualmente, oferece preocupação e representa um grande desafio a ser enfrentado pelas concessionárias de energia, fornecedores de equipamentos elétricos e consumidores. Ocorrências de afundamentos de tensão, combinadas com a sensibilidade dos equipamentos modernos,

têm resultado em significativos prejuízos financeiros, devido, principalmente, ao número expressivo de paradas industriais (KEMPNER, 2017).

Usualmente, os afundamentos são resultantes de faltas no Sistema Elétrico de Potência (SEP) e de ações de chaveamentos para isolar seções em falha. Devido a esta relação, os afundamentos de tensão são eventos aleatórios, já que as faltas elétricas são oriundas de fenômenos naturais, tais como chuva, vento e descargas atmosféricas. Assim como, de outras adversidades inerentes ao sistema: falhas em equipamentos, falhas de operação, contato de objetos e animais em equipamentos energizados, entre outras.

Geralmente, os afundamentos de tensão mais severos são originados por curtos-circuitos francos ou de baixa impedância de defeito, os quais se propagam ao longo do sistema e podem afetar um consumidor sensível mesmo que esteja conectado em um ponto mais distante.

Consequentemente, muitos trabalhos foram desenvolvidos para quantificar estes eventos, identificar as principais causas e efeitos, bem como propor mitigações para o problema, subsidiando informações necessárias para a elaboração e atualização de padronizações relacionadas à QEE.

Recentemente, a padronização IEEE 1564 do (IEEE, 2014), foi atualizada, identificando índices e características apropriados para afundamentos de tensão, bem como métodos para a quantificação. Esta atualização apresenta um índice único que auxilia no cálculo da severidade dos eventos.

Igualmente, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) abriu a Consulta Pública N° 18/2014 (ANEEL, 2014), a fim de aperfeiçoar o Módulo 8 dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST). A revisão da (ANEEL, 2016), com as atualizações provenientes de tal consulta pública, está vigente desde janeiro de 2018. Como novidade, apresenta-se um novo indicador chamado de Fator de Impacto (FI), que estabelece a quantificação do impacto dos afundamentos nos consumidores.

## **1.1 Relevância do Tema**

De acordo com a (EPE, 2017), da totalidade de energia elétrica distribuída no Brasil, a maior parcela entre os anos de 2013 e 2017 foi requerida pelos consumidores industriais, tal como indicado pela Tabela 1. Na Tabela 1 a primeira coluna indica a classe

de consumo, podendo ser residencial, industrial, comercial ou outros (rural, iluminação pública, serviços públicos, poder público e consumo próprio); as demais colunas apresentam o consumo em GWh para cada ano e as linhas o valor correspondente para cada classe consumidora.

Tabela 1: Consumo por Classe em GWh

Classe	2013	2014	2015	2016	2017
Residencial	124.907	132.301	131.189	132.872	133.904
Industrial	184.684	179.105	167.964	163.807	165.883.311
Comercial	83.703	89.840	90.767	87.872	88.129.100
Outros	69.846	73.574	74.162	75.526	76.031

Fonte: (EPE, 2017).

Do mesmo modo, a classe industrial é a mais afetada durante a ocorrência de afundamentos de tensão. Ao mesmo tempo em que a maior parte das cargas dos consumidores recupera a operação normal assim que a tensão retorna a níveis aceitáveis, as cargas industriais podem ter o desempenho prejudicado e levar algumas horas para restabelecer a atividade produtiva. Com uma frequência elevada destes distúrbios, processos industriais são interrompidos em um número expressivo de vezes, representando grandes prejuízos financeiros.

Equivocadamente, é comum caracterizar os problemas de QEE como problemas técnicos, no entanto, a QEE também é um problema técnico-econômico. Em vista disso, (CHOWDHURY, 2001) estimou os custos médios em dólares de distúrbios por evento em diversos ramos industriais nos EUA, conforme apresentado na Tabela 2. As perdas financeiras decorrentes destes distúrbios podem ser calculadas de acordo com (1):

$$Perdas = VPL + CGD - EPD \quad (1)$$

onde  $VPL$  é o valor da produção perdida e representa a receita esperada do consumidor sem a ocorrência do evento;  $CGD$  são os custos gerais dos desligamentos, onde são incluídos os custos de danos de equipamentos, de geração de *backup*, de mão-de-obra ociosa, de matéria-prima desperdiçada, de reinicialização dos processos e quaisquer penalidades devido ao atraso de produção; e  $EPD$  representa as economias provindas dos

desligamentos. São somados os custos de mão-de-obra e materiais que não foram usados durante a interrupção ou afundamento, bem como o custo de energia elétrica caso continuasse sem ininterrupta.

Tabela 2:

<b>Tipo de Indústria</b>	<b>Custo (US\$)</b>
Semicondutores	2.500.000
Manufatura de Equipamentos	100.000
Automobilística	75.000
Química	50.000
Manufatura de Papel	30.000

Fonte: (CHOWDHURY, 2001).

Entretanto, é importante enfatizar que nem todos os afundamentos levam ao desligamento de um processo e que os custos, geralmente, variam com a gravidade do distúrbio. A diferenciação entre os afundamentos que causaram perda dos que não causaram possibilita caracterizar a curva de sensibilidade da carga instalada em cada barramento. Tal caracterização pode ser uma importante ferramenta para a análise de investimento das concessionárias de energia em melhorias de seus sistemas. Diante disso, o sistema cujas cargas possuem grande sensibilidade aos afundamentos de tensão deve ter prioridade de investimento frente àqueles cujas cargas são menos sensíveis (WATANABE, 2010).

Nesse cenário, vale citar que durante a CP N° 018 da (ANEEL, 2014) não foi possível encontrar embasamento para estabelecer penalidades tanto da parte da distribuidora, quanto do consumidor. No documento, foi destacada a necessidade de conhecer a realidade do sistema elétrico brasileiro, para que no futuro, possa-se pensar em um aprimoramento da legislação. Portanto, para tal estabelecimento é essencial que se obtenha um banco de dados consistente que retrate a realidade da qualidade de energia elétrica no Brasil, considerando: as particularidades regionais, a sazonalidade climática, as áreas de predominância, as diferenças de propagação dos fenômenos nos diversos pontos do SEP e os impactos causados em diversos ramos industriais.

Diante do impacto causado pelo fenômeno, da atualização das padronizações e da necessidade de futuras atualizações de tais procedimentos, a quantificação de afundamentos de tensão, a análise das causas e o estabelecimento de mitigações para o problema,

tornam-se interessantes tanto para a concessionária de energia, quanto para o consumidor final. A primeira por visar a análise de investimento em melhorias de seus sistemas; e o segundo a receber energia elétrica com maior qualidade possível, garantindo a competitividade econômica no ramo.

## **1.2 Objetivos e Contribuição da Dissertação**

Haja vista que a quantificação dos eventos e a determinação da causa é de interesse de diferentes integrantes do sistema elétrico, um estudo que contemple a comparação de indicadores propostos em padrões nacional e internacional é de suma importância para contribuir às novas consultas de atualizações. Como também, a investigação das causas de um distúrbio permite estabelecer medidas adequadas para amenizar ou reduzir o número de ocorrências destes eventos.

Diante disso, este trabalho visa contribuir às atualizações de padronizações e às futuras pesquisas em QEE. Assim sendo, o foco principal deste trabalho é investigar as causas dos afundamentos em uma indústria baseado nos indicadores propostos na normatização nacional da (ANEEL, 2016) e internacional do (IEEE, 2014). Deste modo, a pesquisa tem os seguintes objetivos:

- a) Quantificar o número, a severidade e o fator de impacto do fenômeno no consumidor industrial: a partir das amostras da monitoração, utilizar as padronizações mais recentes para quantificação de afundamentos e estabelecer a sensibilidade da indústria frente a essas perturbações;
- b) Analisar as principais variáveis de influência: a partir dos bancos de dados dos afundamentos e das faltas elétricas na região de análise, pretende-se mostrar as particularidades da anomalia no SEP e a influência das variáveis de faltas no fenômeno de QEE;
- c) Analisar a propagação dos afundamentos no SEP: através do histórico de perturbações no SEP, estabelecer a relação entre faltas e afundamentos, determinando assim a área de vulnerabilidade;
- d) Estabelecer medidas de mitigação à ocorrência do distúrbio: a partir da análise das relações das características das faltas elétricas e dos afundamentos de tensão, definir

soluções para redução de ocorrências no SEP e, conseqüentemente, de afundamentos no consumidor;

- e) Validar um modelo de simulação de afundamentos de tensão: a partir dos eventos simultâneos, realizar simulações e comparar a magnitude simulada com a monitorada.

Mediante o exposto, esta dissertação servirá de base para caracterizar a região do SEP em estudo, bem como impacto dos afundamentos nos processos de fabricação dessa indústria. Embora seja apresentado um estudo de caso, este trabalho também fornecerá embasamento para estudos em outros sistemas elétricos e outros setores produtivos. Por conseguinte, este trabalho contribuirá para:

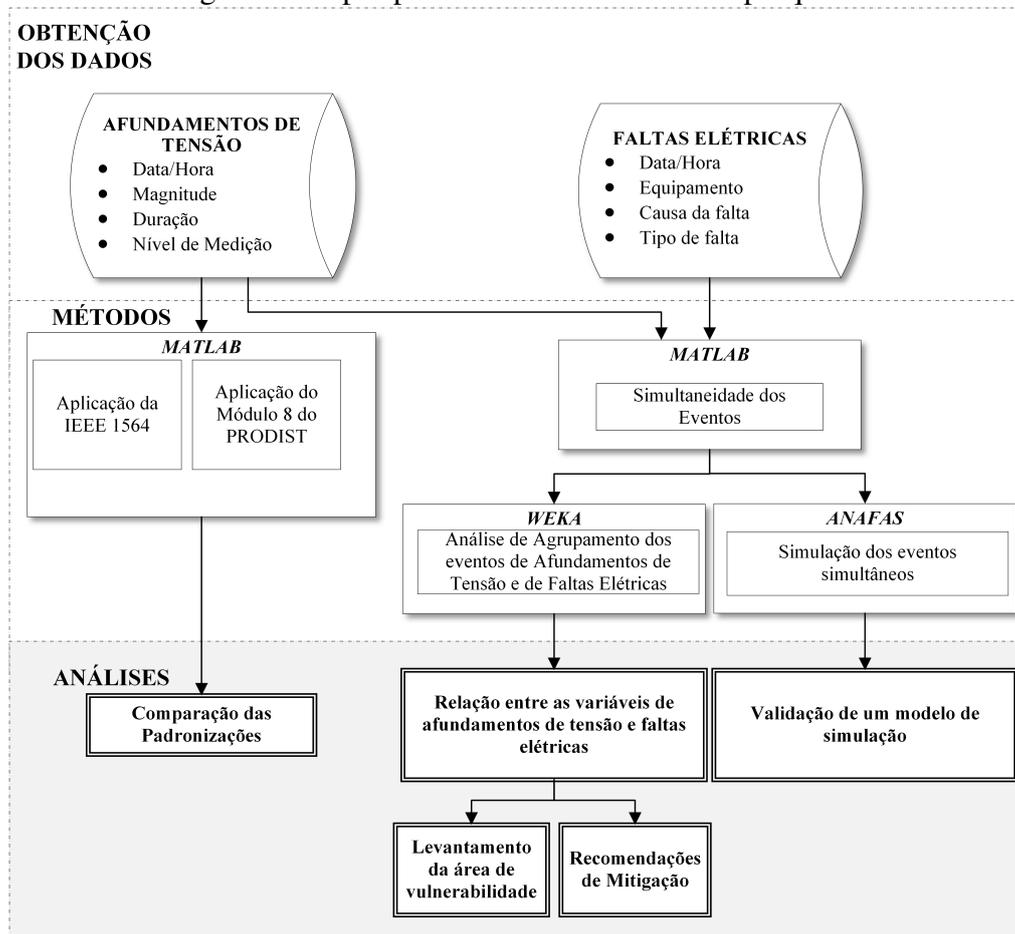
- a) Comparar a atualização das padronizações IEEE 1564 e Módulo 8 do PRODIST ;
- b) Propor alterações para melhor caracterização dos eventos pelas padronizações avaliadas;
- c) Caracterizar o impacto dos afundamentos de tensão no consumidor industrial em estudo;
- d) Levantar a área de vulnerabilidade baseada não só na magnitude, mas também nas classes de sensibilidade do Módulo 8 PRODIST e no índice de severidade da IEEE 1564 ;
- e) Propor soluções de mitigação no SEP para diminuir a incidência de afundamentos de tensão na indústria;
- f) Fornecer embasamento para monitorações, investigações de causa e soluções de mitigação em outros estudos de caso.
- g) Validar um modelo de simulação para futuros estudos preditivos de afundamentos de tensão para o SEP em análise.

### **1.3 Desenvolvimento da Pesquisa**

A fim de aplicar a metodologia descrita nesta dissertação, foram utilizados dois bancos de dados: um de registros de afundamentos de tensão no período de dois anos em um consumidor industrial sensível e outro com o histórico de faltas elétricas no sistema de

transmissão ao qual a indústria está inserida. A Figura 1 apresenta as principais etapas para o desenvolvimento desta pesquisa.

Figura 1: Etapas para o desenvolvimento da pesquisa.



Fonte: O autor, 2018.

Em suma, o trabalho consistiu em avaliar os dados coletados pela indústria e pela concessionária de energia. Os eventos de afundamentos de tensão foram quantificados de acordo com as padronizações IEEE 1564 e Módulo 8 do PRODIST através do *MATLAB*®, sendo confrontados ambos os resultados de cada para cada mês de monitoração.

Igualmente, o *MATLAB*® foi utilizado para verificar a simultaneidade das faltas elétricas e dos afundamentos de tensão, com a intenção de montar um único banco de dados com os eventos que aconteceram na mesma data e hora. Esse novo banco serviu como entrada de dados para o programa *WEKA*, no qual foi realizado o agrupamento entre os eventos simultâneos através do algoritmo *K-means*, e então, descoberta as relações entre

faltas e afundamentos.

Posteriormente, tais relações permitiram determinar a área de vulnerabilidade dos afundamentos de tensão para o consumidor em estudo, bem como propor medidas para mitigar a ocorrência dos eventos.

Adicionalmente, os eventos simultâneos foram utilizados para a validação de um modelo do SEP no programa ANAFAS. As faltas simultâneas ao distúrbio de qualidade foram simuladas, e assim, foram obtidos os erros dos afundamentos simulados em relação aos monitorados.

## **1.4 Estrutura da Dissertação**

Além dos aspectos levantados neste capítulo, esta dissertação está estruturada da seguinte forma: No Capítulo 2 são abordados os conceitos básicos de afundamentos de tensão, descrevendo os principais parâmetros de caracterização dos eventos. Também são apresentadas as padronizações que tratam do assunto, dando ênfase para as que se aplicam à quantificação do distúrbio. Por fim, são mostradas as principais variáveis de influência, bem como os consequentes efeitos no consumidor final e as diferentes proposições para mitigação. Ainda no Capítulo 2, é apresentada uma revisão bibliográfica sobre quantificação de afundamentos de tensão, análise de causas e mitigações de afundamentos de tensão. No Capítulo 3 são mostradas as proposições da pesquisa: primeiramente para a quantificação dos afundamentos de tensão e para comparação das padronizações; e por último para o agrupamento das principais variáveis de influência, para levantamento da área de vulnerabilidade, para recomendações de mitigação e para validação de um modelo. Já o Capítulo 4 contempla o estudo de caso e resultados. Em tal capítulo são descritos os bancos de dados utilizados, bem como as características da indústria e do SEP à qual a mesma está inserida. Além disso, também são apresentados os resultados e as discussões relativas à quantificação dos afundamentos e comparação das normatizações, à análise da área de vulnerabilidade e propagação de afundamentos de tensão no sistema, à análise das variáveis de influência, às recomendações de mitigação e aos erros na validação de um modelo. No Capítulo 5 são levantadas as conclusões obtidas com a realização do trabalho e, também, sugestões para trabalhos futuros no campo de estudo. Por fim, são disponibilizadas as referências bibliográficas utilizadas nesta dissertação, apêndices e anexos.

## **2 AFUNDAMENTOS DE TENSÃO E RELAÇÕES COM FALTAS ELÉTRICAS**

### **2.1 Considerações Iniciais**

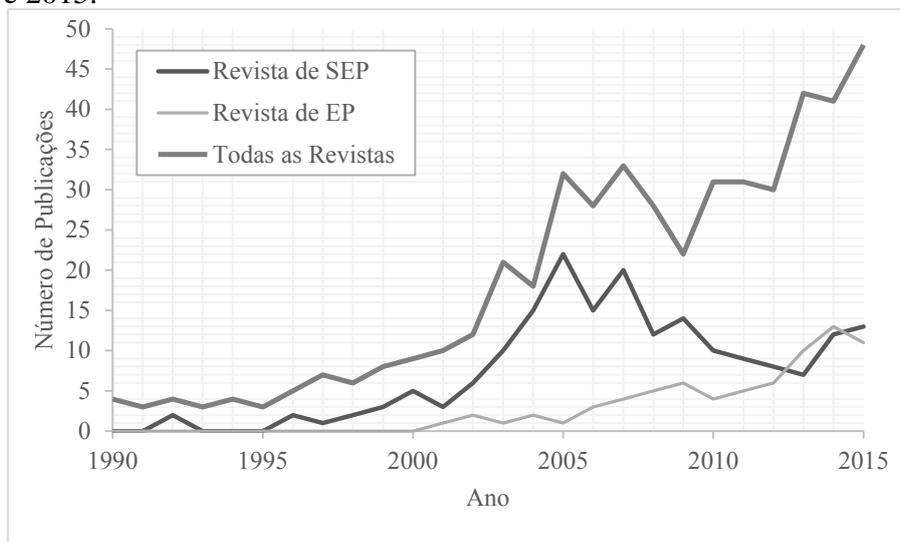
Antes de 1980, os sistemas elétricos de potência eram destinados somente ao transporte de eletricidade dos geradores para os usuários finais, o que significa que a qualidade de energia não foi estudada profundamente até tal década (BAGHERI; BOLLEN, 2016). A QEE se tornou importante nas décadas seguintes por três razões: o uso em massa de dispositivos eletrônicos sensíveis a variações de tensão, o que mostrou a importância do conhecimento dos distúrbios de QEE; a privatização e liberação dos mercados de energia ao redor do mundo, o que aumentou o interesse ao tema e permitiu o desenvolvimento de padronizações para QEE; e o uso de fontes renováveis para geração de energia, o que implicou em novos problemas de QEE (BOLLEN; GU, 2006).

Consequentemente, muito conhecimento foi produzido ao longo dos anos a respeito dos distúrbios relacionados à QEE. Em suma, os desenvolvimentos na área de QEE representam caracterizações, nomenclaturas, padronizações para monitoração e análises, predições, levantamento de causas e de efeitos, bem como de soluções aos problemas (CARNEIRO, 2015).

Neste contexto, (BAGHERI; BOLLEN, 2016) levantou a evolução da pesquisa em afundamentos de tensão, mostrando o número de publicações com o tema em diferentes plataformas científicas. A Figura 2 apresenta tal levantamento das publicações com a temática desde os anos 90 até o ano de 2015 em revistas de SEP e de Eletrônica de Potência (EP).

A Figura 2 mostra que o número de publicações em revistas envolvendo o tema cresceu muito depois de 2000. Também é possível visualizar que o número de artigos apre-

Figura 2: Número de publicações com o tema de afundamentos de tensão entre os anos de 1990 e 2015.



Fonte: Adaptado de (BAGHERI; BOLLEN, 2016).

sentou um pico em torno de 2005 nas revistas de SEP e que a partir deste ano o número de artigos em EP começou a crescer desde então. Em síntese, a maior parte do desenvolvimento teórico em afundamentos de tensão foi desenvolvido entre 1995 e 2005. Nos 10 anos seguintes, muitos resultados provenientes deste desenvolvimento anterior foram utilizados em diferentes aplicações.

Haja vista que os analisadores de QEE foram aperfeiçoados nesse período (com maior capacidade de armazenamento, melhor processamento e comunicação), foi possível um maior entendimento de como os afundamentos de tensão impactam um consumidor sensível. Dessa forma, se tornou possível a inclusão de requisitos para afundamentos de tensão em regulações de QEE.

Em contrapartida, por mais que exista uma maior quantidade de dados de monitoração e um melhor entendimento dos problemas relacionados a afundamentos de tensão, a regulação para este distúrbio de QEE ainda não está totalmente desenvolvida.

Diante do exposto, neste capítulo são abordados os principais conceitos, definições, variáveis de influência e indicadores que foram desenvolvidos na literatura até o momento para afundamentos de tensão. Adicionalmente, são explanadas as padronizações da (IEEE, 2014) e (ANEEL, 2016) que são aplicáveis ao tema. Por fim, são discutidas observações sobre os trabalhos existentes e levantadas as contribuições provinda deste

trabalho.

## 2.2 Conceitos e Definições

Existem duas definições internacionais no que se refere a afundamentos de tensão. A primeira, estabelecida pelo IEEE (EUA) (IEEE, 1998); e a segunda, pela IEC (Europa) (IEC, 1999).

De acordo com a padronização IEEE Std 1346 (IEEE, 1998), um afundamento de tensão é um decréscimo no valor eficaz da tensão durante um período de tempo compreendido entre 1/2 ciclo e 1 minuto. Neste caso, a intensidade do afundamento é definida pela menor tensão remanescente durante a ocorrência do distúrbio. Um evento cuja intensidade é inferior a 0,10 p.u. é considerado como sendo uma interrupção. O IEEE também classifica os afundamentos de tensão, de acordo com a sua duração, em três categorias:

- a) Instantâneos: entre 1/2 ciclo e 30 ciclos;
- b) Momentâneos: entre 30 ciclos e 3 segundos;
- c) Temporários: entre 3 segundos e 1 minuto.

Similarmente, a IEC 61000-2-1 (IEC, 1999) classifica a intensidade do afundamento de tensão pela visão da queda do valor eficaz da tensão. Porém, neste caso, é classificado como afundamento um evento onde ocorra uma queda do valor eficaz da tensão entre 0,10 e 0,99 p.u., durante um período de tempo compreendido entre 1/2 ciclo e alguns segundos. Distúrbios com queda de tensão acima de 0,99 p.u., o que equivale a tensões remanescentes abaixo de 0,01 p.u., são considerados pela IEC como interrupções.

Em âmbito nacional, a regulamentação da qualidade do produto pode ser estratificada de duas formas, uma visando a padronização do assunto no âmbito do sistema interligado nacional (Rede Básica) e outra no âmbito dos sistemas de distribuição de energia elétrica.

Para o caso da Rede Básica, a regulamentação existente no país resume-se aos submódulos 2.8 (ONS, 2016a) e 3.6 (ONS, 2016b) dos Procedimentos de Rede do ONS, os quais são elaborados sob a coordenação do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) e aprovados pela ANEEL. Na transmissão, entende-se por Variação de Tensão de Curta Duração um desvio significativo da amplitude da tensão por curto intervalo de tempo. A amplitude da Variação de Tensão de Curta Duração é definida pelo valor extremo do valor

eficaz (média quadrática) da tensão em relação à tensão nominal do sistema no ponto considerado, enquanto perdurar o evento. A duração da Variação de Tensão de Curta Duração (VTCD) é definida pelo intervalo de tempo decorrido entre o instante em que o valor eficaz da tensão em relação à tensão nominal do sistema no ponto considerado ultrapassa determinado limite e o instante em que a mesma variável volta a cruzar este limite. A partir da duração e amplitude, as VTCDs são classificadas como descrito na Tabela 3.

Tabela 3: Classificação das VTCDs de acordo com os Procedimentos de Rede.

<b>Denominação</b>	<b>Duração</b>	<b>Amplitude em relação a tensão nominal</b>
Interrupção Momentânea de Tensão	Inferior ou igual a três segundos	Inferior a 0,1 p.u
Afundamento Momentâneo de Tensão	Superior ou igual a um ciclo e inferior ou igual a três segundos	Superior ou igual a 0,1 p.u e inferior a 0,9 p.u
Elevação Momentânea de Tensão	Superior ou igual a um ciclo e inferior ou igual a três segundos	Superior a 1,1 p.u
Interrupção Temporária de Tensão	Superior a três segundos e inferior ou igual a um minuto	Inferior a 0,1 p.u
Afundamento Temporário de Tensão	Superior a três segundos e inferior ou igual a um minuto	Superior ou igual a 0,1 p.u e inferior a 0,9 p.u
Elevação Temporária de Tensão	Superior a três segundos e inferior ou igual a um minuto	Superior a 1,1 p.u

Fonte: (ONS, 2016a)

Em relação ao segmento da distribuição de energia elétrica, a regulamentação existente encontra-se disponível no Módulo 8 dos Procedimentos de Distribuição (ANEEL, 2016). Na distribuição, a definição de VTCD é semelhante à da rede básica, considerando como desvios significativos na amplitude do valor eficaz da tensão durante um intervalo de tempo inferior a três minutos. As VTCDs são classificadas na distribuição de acordo com a Tabela 4.

### 2.2.1 Caracterização dos Afundamentos

Os parâmetros principais na caracterização de um afundamento de tensão são a magnitude e a duração do evento. A amplitude é a tensão remanescente registrada durante

Tabela 4: Classificação das VTCDs de acordo com os Procedimentos de Distribuição.

<b>Denominação</b>	<b>Duração</b>	<b>Amplitude em relação a tensão nominal</b>
Interrupção Momentânea de Tensão	Inferior ou igual a três segundos	Inferior a 0,1 p.u
Afundamento Momentâneo de Tensão	Superior ou igual a um ciclo e inferior ou igual a três segundos	Superior ou igual a 0,1 p.u e inferior a 0,9 p.u
Elevação Momentânea de Tensão	Superior ou igual a um ciclo e inferior ou igual a três segundos	Superior a 1,1 p.u
Interrupção Temporária de Tensão	Superior a três segundos e inferior ou igual a três minutos	Inferior a 0,1 p.u
Afundamento Temporário de Tensão	Superior a três segundos e inferior ou igual a três minutos	Superior ou igual a 0,1 p.u e inferior a 0,9 p.u
Elevação Temporária de Tensão	Superior a três segundos e inferior ou igual a três minutos	Superior a 1,1 p.u

Fonte: (ANEEL, 2016)

a ocorrência do distúrbio. A duração é o tempo durante o qual o valor eficaz da tensão permanece abaixo do limiar da tensão de referência. Geralmente, o tempo de permanência transcorre desde o instante inicial do defeito até a atuação do sistema de proteção ou a completa eliminação do defeito, sendo, portanto, dependentes dos dispositivos e das filosofias de proteção adotadas pelas concessionárias (LEBORGNE, 2003).

Assim sendo, são avaliadas a magnitude e a duração de um evento, por meio do valor eficaz da tensão (tensão residual em função da tensão nominal). Para a obtenção de qualquer registro a partir das tensões fornecidas por um Transformador de Potencial (TP) ou diretamente da rede em baixa tensão, os analisadores de qualidade da energia elétrica possuem taxa de amostragem e resolução definidas. Tais especificações auxiliam na escolha de um equipamento, uma vez que permitem comparar e priorizar a precisão *versus* o custo (RAMOS, 2000).

Neste contexto, a taxa de amostragem normalmente é dada em números de amostras por ciclo da frequência fundamental do sistema elétrico, conforme os fenômenos que se deseja medir. Os sinais analógicos são contínuos no tempo e apresentam uma infinidade

de valores, que pela taxa de amostragem são representados de maneira discreta no tempo, a partir de amostras, possibilitando reconstituir o sinal original com exatidão aceitável. A partir de 16 amostras por ciclo é possível registrar VTCD, no entanto, a maioria dos registradores comercializados contemplam o monitoramento das componentes harmônicas, elevando as taxas de amostragens para níveis significativamente superiores (CARNEIRO, 2015).

Diante disso, o documento IEC 61000-4-30 (IEC, 2005a) define que a medição básica de um afundamento ou elevação de tensão é a tensão eficaz atualizada a cada semiciclo em cada canal medido. As amostras de tensão são obtidas em função do tempo para cada fase medida. No caso de sistemas de medição trifásica, obtém-se a tensão eficaz no tempo para cada fase separadamente, permitindo analisar a magnitude e a duração de cada evento por fase.

Conseqüentemente, a (IEC, 2005a) estabelece que a determinação da magnitude do afundamento de tensão é levantada a partir da utilização da tensão RMS, calculando ao longo de um ciclo e atualizando a cada meio ciclo. Além disso, a (IEC, 2005a) recomenda que a taxa de amostragem seja sincronizada com a frequência do sistema, ou seja, a frequência de amostragem não é um número fixo de amostras por segundo, mas um número fixo de amostras por ciclo.

Neste caso, a tensão do evento será:

$$V_{rms}(k) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1+k-N}^k v_i^2}, \quad (2)$$

onde  $N$  é o número de eventos por ciclo,  $v_i$  é a amostra da forma de onda de tensão e  $k$  representa o índice da janela, variando de  $N$  a  $M$ , sendo  $M$  o número total de amostras.

Adicionalmente, a (IEC, 2005a) determina que a detecção e caracterização das VTCD sejam realizadas por meio de instrumentos de medição que considerem como parâmetro de referência uma tensão fixa ou uma tensão média deslizando, de acordo com:

$$V_r(n) = 0,9967V_r(n-1) + 0,0033\bar{V}_{rms}, \quad (3)$$

sendo  $V_r(n)$  o valor calculado da tensão de referência,  $V_r(n-1)$  o valor prévio da tensão de referência e  $\bar{V}_{rms}$  o valor da tensão eficaz média de 12 ciclos mais recentes.

Finalmente, em termos de duração, a (IEC, 2005a) caracteriza como o intervalo de tempo decorrido entre o instante em que este limite de referência é ultrapassado e o instante em que volta a cruzar esse limite, retornando à condição I de operação.

### 2.2.2 Variáveis de Influência

Afundamentos de tensão são principalmente causados por faltas elétricas em um SEP ou na rede interna dos consumidores. As faltas elétricas estão associadas a alterações climáticas, tais como: chuva, umidade, temporal, vento forte e descargas atmosféricas. Bem como, podem ser oriundas de contato por animais, contaminação de isoladores, poluição, ações do homem e falhas operacionais.

Além das faltas elétricas na mesma barra do consumidor, os afundamentos nos terminais do equipamento podem ser também causados por um curto-circuito ocorrido a centenas de quilômetros no sistema de transmissão. Assim, um afundamento de tensão é dito como um problema global.

Embora os curtos-circuitos sejam as causas mais recorrentes e as mais severas aos afundamentos de tensão, as ocorrências também podem ser outras origens, tais como inicialização de grandes cargas (tais como motores de indução e fornos a arco) e energização de transformadores (BOLLEN, 2000).

### 2.2.3 Efeitos dos Afundamentos de Tensão e Curvas de Sensibilidade

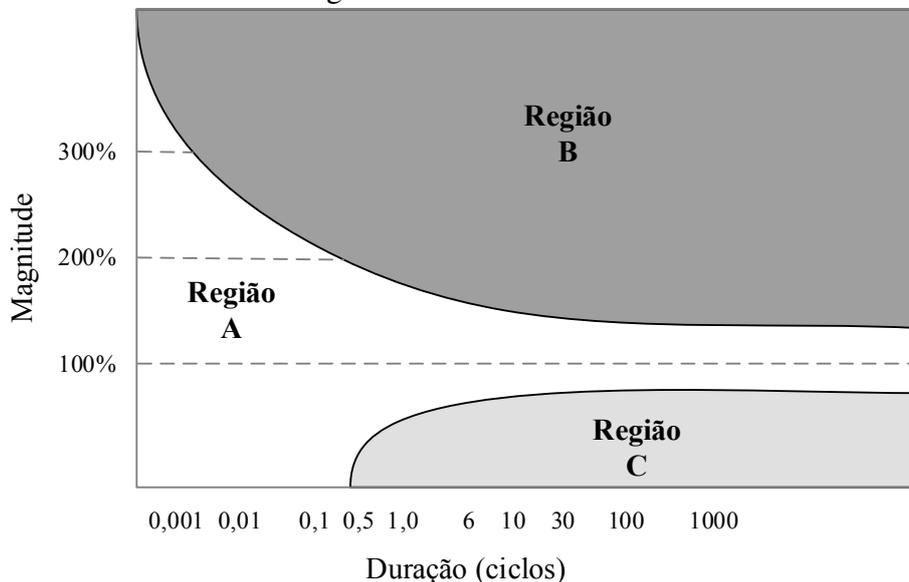
A operação e a vida útil dos equipamentos elétricos são afetados quando submetidos a tensão diferentes da nominal, considerada pelo fabricante na concepção do equipamento. Deste modo, a sensibilidade de um equipamento pode ser definida como a incapacidade deste em se manter em operação na presença de alterações no fornecimento de energia além das quais foi projetado.

Normalmente, para estabelecer limites de tolerância das cargas frente aos afundamentos de tensão, são realizados ensaios empíricos com a aplicação de eventos programados em uma família de equipamentos, onde é observada a suportabilidade destes equipamentos na ocorrência destes distúrbios. Posteriormente, são elaboradas curvas de sensibilidade atendendo tais limites, cujos eixos representam a intensidade e duração dos afundamentos (KEMPNER, 2017).

Neste cenário, a curva CBEMA (*Computer Business Equipment Manufacturer Association*) (ITI, 2000) foi introduzida por (KEY, 1979) e publicada em 1987 na (IEEE, 1995). O desenvolvimento de tal curva possibilitou descrever a tolerância típica de diferentes computadores às variações de tensão tanto em magnitude quanto em duração do evento. A Figura 3 representa as regiões de operação da curva CBEMA para os equipamentos

eletrônicos e os limites mínimo e máximo que a tensão de alimentação da rede elétrica pode variar sem desligar ou danificar os equipamentos.

Figura 3: Curva CBEMA.

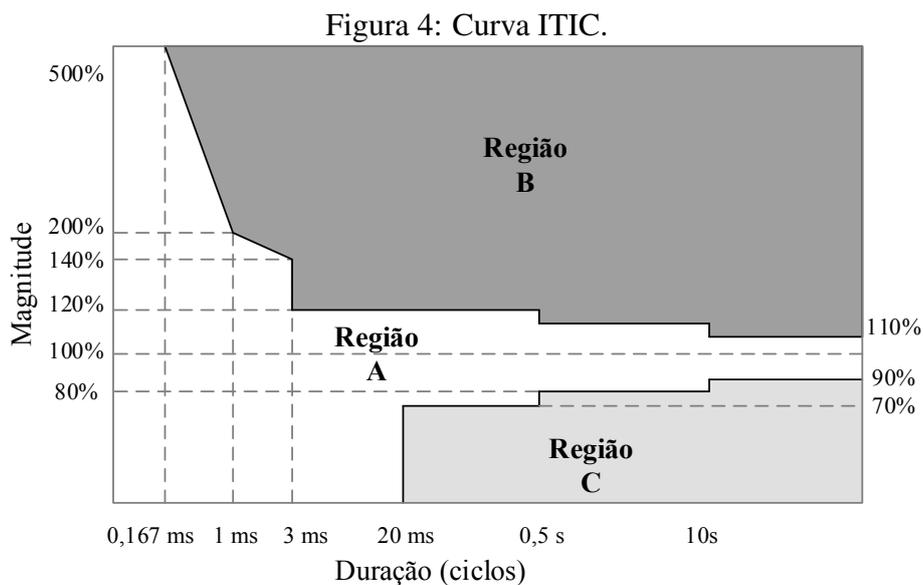


Fonte: Adaptado de (ITI, 2000).

Na Figura 3, as regiões de operação A, B e C representam os seguintes comportamentos:

- a) Região A: é a região de operação I ou de imunidade. Eventos situados em A não causam alteração em seu funcionamento dos equipamentos;
- b) Região B: é a região de susceptibilidade. Os eventos situados em B representam sobre-tensões temporárias de tensão. Tais distúrbios apresentam possibilidade de ruptura da isolação dos equipamentos, em outras palavras, danos permanentes aos componentes;
- c) Região C: é a região de sensibilidade ou desligamento. Os eventos situados na região C representam afundamentos de tensão com possibilidade de falhas de operação dos equipamentos.

Posteriormente, foram realizadas alterações na faixa de amplitude em relação à curva CBEMA para melhorar caracterizar a sensibilidade dos computadores e equipamentos eletrônicos relacionados à tecnologia da informação. Desta forma, foi estabelecida a curva ITIC (*Information Technology Industry Council*) (ITI, 2000), apresentada na Figura 4, sendo mais indicada na avaliação da sensibilidade de equipamentos computacionais.



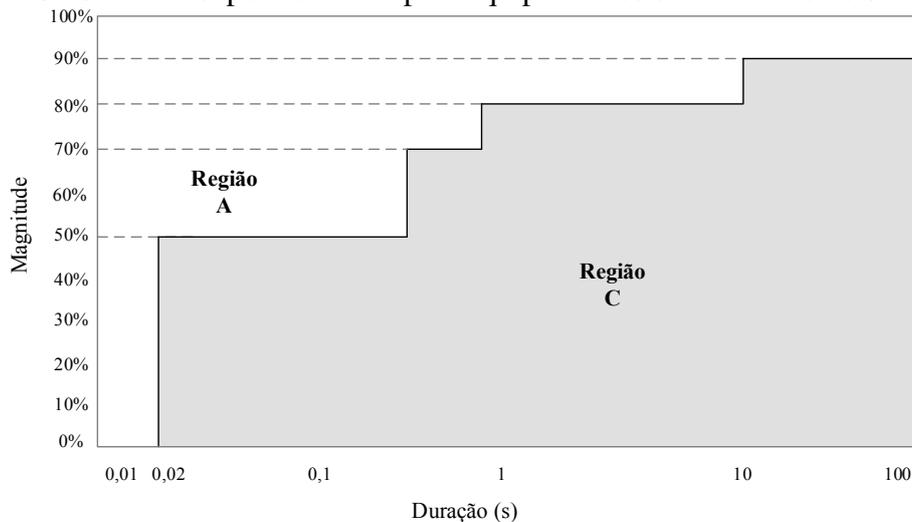
Fonte: Adaptado de (ITI, 2000).

Sequencialmente, foi desenvolvida uma nova curva para verificar a imunidade dos equipamentos e processos ligados a fabricantes de semicondutores por (LAB, 2006). Tal curva foi nomeada de SEMI (*Specification for Semiconductor Processing Voltage Sag Immunity*), publicada na SEMI F47-0706 (LAB, 2006). A Figura 5 apresenta a curva SEMI F47. Vale citar que a região B não consta em tal curva, pois a caracterização abrange apenas afundamentos de tensão.

Além das curvas citadas, alguns pesquisadores realizaram ensaios de tolerância para vários equipamentos sensíveis a variações de tensão de curta duração. Neste âmbito, (BOLLEN, 2000) apresentou a tolerância para tensão dos principais equipamentos na indústria. A Tabela 5 mostra a tolerância dos dispositivos levantada por (BOLLEN, 2000). O limite superior e o inferior representam a faixa de sensibilidade para cada equipamento. Igualmente, (LEBORGNE, 2003) também analisa o efeito das variações de curta duração nas principais cargas presentes nos processos industriais, tais como contatores, acionamentos de velocidade variável, motores de indução, entre outros dispositivos.

Diante disso, para a análise da sensibilidade dos equipamentos, o ideal seria cada fabricante disponibilizar informações sobre o comportamento de um determinado dispositivo frente a variações de tensão de curta duração. No entanto, na falta de curvas específicas, o diagnóstico pode ser realizado com as curvas padrões apresentadas.

Figura 5: Curva de suportabilidade para equipamentos semicondutores Semi F47



Fonte: Adaptado de (LAB, 2006).

Tabela 5: Tolerância de tensão para os principais equipamentos industriais.

Equipamento	Limite Superior	Média	Limite Inferior
CLP	20 ms, 75%	260 ms, 60%	620 ms, 45%
Cartão de Entrada CLP	20 ms, 80%	40 ms, 55%	40 ms, 30%
Driver AC 5 HP	30 ms, 80%	50 ms, 75%	80 ms, 60%
Relés de Controle AC	10 ms, 75%	20 ms, 65%	30 ms, 60%
Partida de Motor	20 ms, 80%	50 ms, 50%	80 ms, 40%
Computador Pessoal	30 ms, 80%	50 ms, 60%	70 ms, 50%

Fonte: (BOLLEN, 2000).

#### 2.2.4 Área de Vulnerabilidade

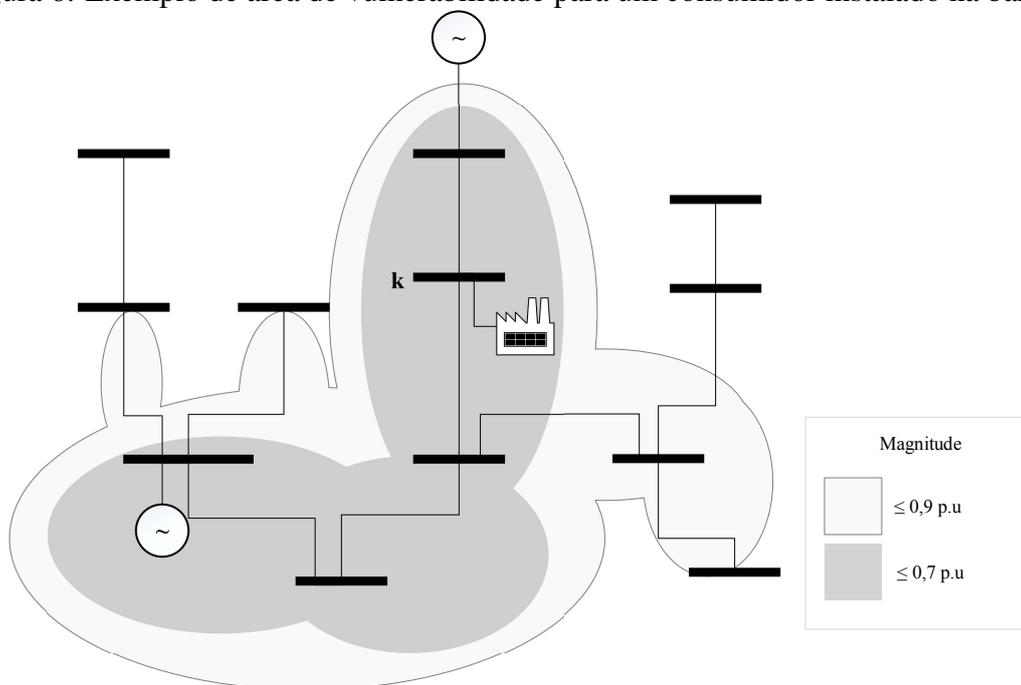
A área de vulnerabilidade é também chamada de zona crítica por (GOMEZ et al., 2002), ou região de sensibilidade por (DUGAN; MCGRANAGHAN; BEATY, 2004), ou também de área exposta por (KEMPNER, 2017). O conceito foi desenvolvido para ajudar na avaliação da probabilidade de uma carga específica estar sujeita a afundamentos de tensão de determinada magnitude em função de curtos-circuitos em diferentes barra de um SEP.

De acordo com (CARPINELLI et al., 2009), a área de vulnerabilidade é a região que abrange os nós e segmentos de linha onde a ocorrência de faltas levará a afundamentos

de tensão em um nó genérico  $k$ . Em outras palavras, é a área associada a um ponto de monitoração onde a ocorrência de faltas elétricas nas demais barras do sistema pode ocasionar afundamentos na barra analisada abaixo de limites críticos.

A fim de ilustrar o conceito de (CARPINELLI et al., 2009), a Figura 6 mostra a área exposta a afundamentos de tensão para um consumidor conectado na barra  $k$  em dois limiares de magnitude. Em geral, a área de vulnerabilidade é obtida através de simulações de faltas em todas as barras do sistema, definindo uma área em torno de um ponto da rede (barra  $k$ ) onde se encontra o consumidor e seus equipamentos ou processos sensíveis.

Figura 6: Exemplo de área de vulnerabilidade para um consumidor instalado na barra  $k$ .



Fonte: O autor, 2018.

Neste âmbito, uma observação importante é que as barras próximas da barra de observação são mais vulneráveis a afundamentos de tensão. Adicionalmente, que a potência de curto-circuito também tem influência: quanto menor for a potência de curto-circuito no ponto monitorado, maior será a área de exposição (GOSWAMI; GUPTA; SINGH, 2008).

### 2.2.5 Mitigação de Afundamentos de Tensão

Na maioria dos casos, um único curto-circuito pode causar afundamentos de tensão para diversos consumidores. Por exemplo, no ponto de ocorrência da falta a tensão cai a zero ou a um valor extremamente baixo. Imediatamente, esse valor baixo de tensão é

propagado no SEP, representando um evento com certa magnitude e duração.

Baseado nisto, (GRIGSBY, 2016) apresenta vários métodos de mitigação que podem ser implementados:

- a) Reduzir o número de faltas: Esta técnica além de reduzir os afundamentos de tensão, também permite diminuir a frequência de interrupções de longa duração. Geralmente, as concessionárias de energia já fazem essa redução do número de curto-circuitos, em virtude destas falhas também danificarem equipamentos da rede. Porém, tais melhorias são realizadas de acordo com os interesses das transmissoras ou distribuidoras. Assim, dependendo das condições de qualidade de energia fornecidas a um consumidor, outros pontos de um SEP podem ser mais impactantes. Por exemplo, a ocorrência de afundamentos de tensão pode estar relacionada a uma ou duas linhas do sistema de transmissão. Assim, a solução seria estudar maneiras de reduzir as ocorrências de faltas em tais linhas.
- b) Reduzir o tempo de extinção das faltas: Esta medida não diminui o número de eventos, mas impacta na duração dos afundamentos, e por conseguinte, na severidade. No entanto, por mais que esta solução possa ser viável, a redução do tempo de atuação do sistema de proteção pode representar perda de seletividade no SEP.
- c) Alterar o sistema de fornecimento de energia: Alterações na alimentação do consumidor sensível podem reduzir a severidade dos afundamentos de tensão. Por exemplo, a instalação de um gerador próximo a uma carga sensível manteria o nível de tensão adequada durante um afundamento de tensão.
- d) Conectar equipamentos de mitigação entre o equipamento sensível e a rede: Este método é o mais aplicado e consiste na instalação de um equipamento adicional entre o SEP e o dispositivo sensível. A popularidade desta solução é explicada por ser o único ponto em que o consumidor tem controle sobre a situação. Alguns exemplos destes equipamentos são: *Uninterruptable Power Supply* (UPS), no qual a carga é suprida entre 15 e 30 minutos por uma bateria interna durante a ocorrência de uma interrupção ou afundamento; *Dynamic Voltage Restorer* (DVR), tal dispositivo utiliza componentes de eletrônica de potência para inserir uma fonte de tensão em série com a rede e a carga.

e) Aperfeiçoar a imunidade do equipamento: Essa medida é a mais efetiva contra falhas devido a afundamentos de tensão. No entanto, não é uma solução adequada a curto prazo. Alguns equipamentos industriais podem ser feitos sob encomenda para uma determinada aplicação, o que permite a incorporação de requisitos de tolerância de tensão na especificação. Além de melhorar equipamentos de grande porte (acionamentos, computadores de controle de processo), uma inspeção completa da imunidade de todos os contadores, relés, sensores, etc. pode melhorar significativamente a tolerância de tensão do processo.

## **2.3 Principais Trabalhos Existentes: Estado da Arte**

### **2.3.1 Principais Desenvolvimentos Relacionados às Padronizações IEEE 1564 e Prodist Módulo 8**

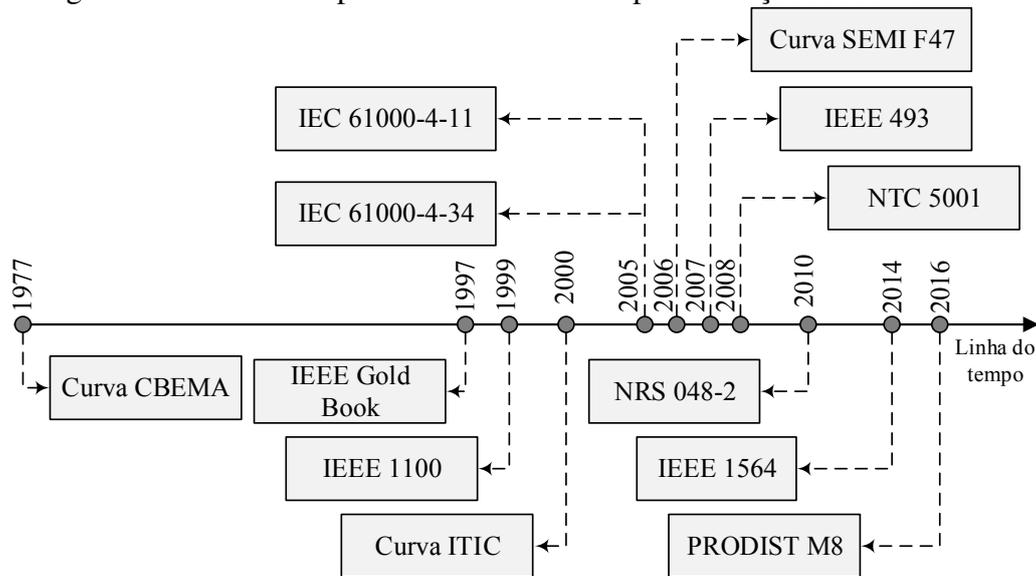
A padronização da suscetibilidade de equipamentos eletrônicos em relação à Qualidade de Energia Elétrica (QEE) foi introduzida por (IEEE, 1999). Desde então, diversos estudos analisaram a influência da magnitude, duração e frequência de ocorrência dos eventos, elaborando métodos de detecção de interferências eletromagnéticas na operação de equipamentos (IEEE, 2007), estimativas de regiões de sensibilidade baseadas em semicondutores (IEC, 2005b), faixas de tolerância dos equipamentos a VTCD (IEC, 2005a) e estratificando os eventos em categorias baseada em limites de ocorrências (IEC, 1996).

Haja vista que um afundamento com tensão residual próxima a 0,9 pu e ampla duração poderá ter maior impacto se comparado com outro afundamento de menor duração, por exemplo, se faz necessária a proposição de padronizações para mensurar o impacto e a severidade dos eventos. Neste contexto, a Figura 7 apresenta a linha do tempo das mais relevantes padronizações desenvolvidas entre 1977 e 2016.

De maneira a caracterizar os afundamentos de tensão, em janeiro de 2000 foram estabelecidos os índices de tensão pelo (IEEE, 2017). Nos quatro anos subsequentes, um grupo de trabalho (força tarefa P1564) reuniu-se semestralmente para elaborar métodos de quantificação da severidade de eventos individuais, os quais foram publicados no *IEEE Guide for Voltage Sag Indices* (guia para índices de afundamentos de tensão). Tal severidade permite avaliar tanto o desempenho local (consumidor final) e global (sistema de distribuição ou transmissão de energia elétrica).

No Brasil, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) abriu a Consulta Pública

Figura 7: Linha do tempo das mais relevantes padronizações desenvolvidas.



Fonte: Elaborada pelo autor.

n. 05/2011 (ANEEL, 2011), a fim de aperfeiçoar os procedimentos regulatórios de VTCD, atualizando o Módulo 8 dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST) (ANEEL, 2016). Entretanto, devido à complexidade do tema, a discussão foi ampliada com a Consulta Pública n. 18/2014 (ANEEL, 2014), de maneira a estabelecer um procedimento para medição das VTCD, bem como implantar índices de desempenho e aplicar limites de referência para os fenômenos envolvendo a qualidade da energia elétrica.

Na padronização da (ANEEL, 2016) foi proposta uma categorização dos eventos, semelhante à desenvolvida em (IEC, 1996), e, a partir disso, apresentado um método para cálculo de um índice único. Embora a metodologia tenha sido desenvolvida para a rede de baixa tensão, a normatização brasileira apresenta ponderação para níveis de até 230 kV.

Assim, em âmbito internacional, a caracterização dos afundamentos de tensão é padronizada conforme (IEEE, 2014), a qual detalha os métodos para a quantificação e classificação das ocorrências, e unifica a avaliação de diversos aspectos em um índice que representa a severidade de cada evento. Analogamente, em âmbito nacional, a caracterização dos afundamentos de tensão é padronizada por meio de um Fator de Impacto (FI), proposto pela ANEEL e cuja vigência ocorre desde janeiro de 2018.

Apesar dos métodos citados diferirem na forma de cálculo, ambos baseiam-se na du-

ração e magnitude das VTCD, classificando o seu efeito sobre um sistema.

Em termos de magnitude, ambas estabelecem que a mesma é dada pela menor tensão residual durante o evento, normalizada pelo valor de referência. Ambas definem afundamento de tensão como eventos cuja magnitude está entre 0,1 e 0,9 pu da tensão de referência.

Entretanto, os limites de duração para que o evento seja computado diferem entre os dois padrões. A ANEEL (ANEEL, 2016) estabelece um período de tempo de até três minutos e o IEEE (IEEE, 2014) considera um período menor que um minuto.

A Associação Brasileira de Grandes Consumidores Industriais de energia e de Consumidores Livres (ABRACE) sugeriu à ANEEL em (ANEEL, 2014) a adequação desse limite às reais condições em que os sistemas de distribuição brasileiros estão inseridos atualmente. Este limite foi estabelecido com base no tempo de religamento manual mais antigos. Como hoje, os religamentos da distribuição são realizados de maneira automática, não se justifica, portanto, um tempo tão longo de 3 minutos.

Quanto ao período de monitoramento, em (IEEE, 2014) é indicado um ano, podendo-se normalizar o índice para cada caso mensal. Em contrapartida, mesmo baseando-se na NRS 048 (IEC, 1996), a qual estabelece um ano de monitoramento, a ANEEL (ANEEL, 2016) propõe um período mínimo de 30 dias consecutivos de medição, não sendo impedido um tempo de monitoração maior que este. A proposta da monitoração em curto intervalo de tempo visa garantir que o consumidor industrial tenha uma resposta mais rápida acerca da qualidade de energia fornecida. No entanto, as conclusões diante dessas medições não levariam em consideração a sazonalidade dos eventos, justificando a monitoração mais longa (OLIVEIRA MONTEIRO; FERREIRA FILHO, 2016).

Neste enquadramento, a atualização da IEEE 1564 foi tratada por (SABIN; BOLLEN, 2014), onde uma visão geral da padronização foi apresentada. Tal trabalho sumariza os métodos para quantificação individual, local e global dos afundamentos de tensão, mas não realiza um estudo de caso com o indicador.

Adicionalmente, (ARIAS-GUZMÁN et al., 2017) apresentou a quantificação do impacto dos afundamentos em um circuito de distribuição industrial através do índice severidade. Foi concluído por (ARIAS-GUZMÁN et al., 2017) que a severidade média mensal ou anual foi um parâmetro mais importante do que a quantidade de afundamentos no mesmo período.

Similarmente, (OLIVEIRA MONTEIRO; FERREIRA FILHO, 2016) realizou uma análise comparativa entre a proposta de atualização do PRODIST e a NRS 048 da África do Sul (IEC, 1996), utilizando para isso dados reais de medição em circuito de distribuição. Em tal trabalho foi concluído que embora o procedimento brasileiro tenha se baseado no sul-africano, ao se aplicar o mesmo conjunto de dados às duas padronizações, o diagnóstico foi diferente. A principal conclusão para isso foi a questão do período de análise, já que a NRS 048 aplica-se a um ano e a da ANEEL apenas a um mês, indicando a necessidade do padrão brasileiro de indicar a monitoração permanente ou em um período maior de tempo.

Finalmente, (KEMPNER, 2017) apresentou um resumo das contribuições e indicações de aprimoramento da consulta pública da ANEEL, enfatizando a necessidade de instalar os medidores em pontos estratégicos do sistema para capturar o maior número de eventos e ponderar o fator de impacto de acordo com a precipitação de cada estado.

### **2.3.2 Principais Trabalhos de Correlação entre Faltas e Afundamentos**

Diversos estudos têm estabelecido a correlação entre afundamentos de tensão e faltas elétricas em um SEP. Geralmente, distúrbios no sistema de transmissão são mais severos para equipamentos industriais, se comparado aos afundamentos de tensão registrados com o sistema de distribuição .

Neste contexto, (ESSL; RENNEN, 2016) demonstrou a dependência dos afundamentos de tensão com as características de falta de um SEP em diferentes níveis de tensão. Devido a implementação do sistema de transmissão em malha, os afundamentos de tensão causados por falhas nas transmissão se propagam por longas distâncias.

Adicionalmente, os trabalhos de (ESSL; RENNEN, 2016) e (MIRANDA FILHO et al., 2016) contribuíram para compreender essa propagação do fenômeno e as causas de falhas no sistema de potência, mesmo sem exemplos ou casos numéricos.

Analogamente, (OLIVEIRA et al., 2010) apresentou alguns avanços baseados na variação de carga e na energia não entregue em um sistema de transmissão. Neste caso, a variação do fluxo de potência foi usada para avaliar a severidade dos afundamentos de tensão. A correlação entre a perda de carga e as características da fonte de afundamentos (como tipo de falha, causa da falta, localização da falta, resistência à falta, estação e parte do dia em que cada falta ocorre) foi obtida para analisar a queda de tensão impacto.

Apesar do fato de (OLIVEIRA et al., 2010) ter estabelecido importantes conclusões e utilizado dados reais de falhas elétricas de um sistema de potência, a análise dos eventos não foi realizada por monitoramento, mas por meio da energia não-fornecida.

Finalmente, o estudo de (DE SANTIS et al., 2018) trata da avaliação da origem de afundamentos de tensão devido a faltas em redes reais interconectadas por meio de métodos preditivos. Somente medidas dos afundamentos de tensão foram utilizadas. Em tal trabalho, os dados dos sistemas de proteção não foram usados e as faltas elétricas foram estimadas para cada registro de afundamento de tensão. Além disso, é exposto que as origens dos afundamentos de tensão podem ser obtidas correlacionando os seus tempos iniciais com os das faltas elétricas. No entanto, para obter essas relações, a pesquisa evidencia a necessidade de sincronização entre as medições.

### **2.3.3 Observações e Ponderações sobre as Propostas Existentes**

Na seção anterior foram citados os principais trabalhos relacionados às padronizações IEEE 1564 e ao módulo 8 do PRODIST. Bem como, as propostas existentes para correlacionar os afundamentos de tensão com as faltas elétricas.

A Tabela 6 apresenta a comparação da análise proposta nesta dissertação com trabalhos que contemplam as padronizações do IEEE e da ANEEL. Em tal tabela, foram levantadas as padronizações utilizadas (IEEE 1564 e/ou módulo 8 do PRODIST), e o método de análise das padronizações: qualitativo (explicações teóricas da padronização) ou quantitativo (explicações baseadas em dados monitorados).

Pelo levantamento feito, percebe-se que nenhuma das referências anteriores contemplou um estudo com as duas padronizações. Assim, ao comparar as atualizações dessas padronizações, a contribuição deste trabalho é justificada.

Igualmente, a Tabela 7 apresenta a comparação de trabalhos recentes que contemplam a relação de faltas elétricas com afundamentos de tensão. A comparação foi baseada no método de avaliação dos afundamentos (predição ou monitoração), no acesso às características das faltas (simulações ou dados reais), no indicador para área de vulnerabilidade (magnitude, classe de sensibilidade ou severidade) e na existência de recomendações para mitigação.

Desta forma, é notado que a maioria dos trabalhos contemplam a avaliação dos afundamentos de tensão por métodos preditivos. Bem como, somente o trabalho de (OLI-

Tabela 6: Comparação de trabalhos que contemplam as padronizações IEEE 1564 e/ou Prodist.

Características		Referências				*
		A	B	C	D	
Padronização	IEEE 1564	x		x		x
Contemplada	PRODIST Módulo 8		x		x	x
Método de Análise	Qualitativo	x	x	x	x	x
	Quantitativo		x	x	x	x

Fonte: O autor, 2018.

Referência A: (SABIN; BOLLEN, 2014)

Referência B: (OLIVEIRA MONTEIRO; FERREIRA FILHO, 2016)

Referência C: (ARIAS-GUZMÁN et al., 2017)

Referência D: (KEMPNER, 2017)

\*: Análise proposta nesta dissertação.

VEIRA et al., 2010) acessa às características de faltas elétricas através de dados reais de operação do SEP.

Adicionalmente, em relação ao levantamento da área de vulnerabilidade, todos os trabalhos que estabelecerem tal delimitação utilizaram como indicador somente a magnitude dos afundamentos de tensão. Portanto, a contribuição deste trabalho no levantamento da área exposta baseado nas classes de sensibilidade definidas por (ANEEL, 2016) e pela severidade definida por (IEEE, 2014) também é comprovada.

Finalmente, em nenhum dos trabalhos foram encontradas recomendações para o SEP na mitigação dos afundamentos de tensão. De fato, o trabalho de (DE SANTIS et al., 2018) destaca a importância de estudos adicionais de correlação dos eventos para o estabelecimento de recomendação de medidas para manutenção preventiva no SEP. Assim sendo, a proposta de medidas para mitigação no SEP para diminuição da incidência de afundamentos de tensão na indústria também é justificada.

Tabela 7: Comparação de trabalhos que contemplam a relação de faltas elétricas com afundamentos de tensão.

Características		Referências					*
		A	B	C	D	E	
Método de Avaliação dos Afundamentos	Predição	x	x	x	x		
	Monitoração					x	x
Acesso às Características das Faltas	Através de Simulações		x	x	x	x	
	Através de Dados Reais	x					x
Indicador para Área de Vulnerabilidade	Magnitude	x		x	x	x	x
	Classe de Sensibilidade						x
	Severidade						x
Recomendação para Mitigação	Propõe soluções no SEP						x

Fonte: O autor, 2018.

Referência A:(OLIVEIRA et al., 2010)

Referência B:(MIRANDA FILHO et al., 2016)

Referência C:(PARK; JANG, 2017)

Referência D:(ESSL; RENNER, 2016)

Referência E:(DE SANTIS et al., 2018)

\*: Análise proposta nesta dissertação.

## 2.4 Considerações Finais

Neste capítulo foram apresentados os principais conceitos relacionados a afundamentos de tensão, as variáveis de influência, os efeitos nos equipamentos e métodos para mitigação dos afundamentos de tensão. Além disso, também foram levantados os principais trabalhos desenvolvidos com as padronizações IEEE 1564 e módulo 8 do PRODIST. Bem como, dos que estabelecem a correlação entre faltas elétricas e afundamentos de tensão. Por fim, foram realizadas observações e ponderações dos trabalhos anteriores, comparando com a proposta estabelecida nesta dissertação. Assim, as proposições e contribuições deste trabalho foram justificadas.

## **3 METODOLOGIA PROPOSTA**

### **3.1 Considerações Iniciais**

O Capítulo 2 apresentou uma revisão bibliográfica sobre a quantificação de afundamentos de tensão, a atualização de padronizações, as principais causas dos eventos e as técnicas de mitigação para o problema. Haja vista que as atualizações da IEEE 1564 e do módulo 8 do PRODIST são recentes, bem como diferem nas definições e metodologias de quantificação, a aplicação e comparação de ambas tornam-se de suma importância.

Neste contexto, (SABIN; BOLLEN, 2014) afirmam que um importante desafio para estabelecer contribuições à regulação do distúrbio está na análise das grandes quantidades de dados obtidos da monitoração de QEE e, preferencialmente, como extrair informação por meio de métodos de análise automáticos. Assim, visto que as principais causas dos afundamentos são as faltas elétricas, compreender a relação entre as variáveis de origem destas ocorrências contribui à comunidade científica, já que este trabalho utiliza dados reais de ambos os fenômenos.

Dessa maneira, esta pesquisa estabelece uma metodologia útil na caracterização de um SEP frente a um consumidor sensível a afundamentos de tensão. Portanto, os resultados obtidos permitem conhecer o impacto dos eventos em determinadas regiões de um SEP e, assim, propor mitigações no SEP em estudo.

## **3.2 Proposição para Quantificação dos Afundamentos de Tensão e Comparação das Padronizações IEEE 1564 e PRODIST Módulo 8**

A metodologia proposta para a quantificação dos afundamentos e para a comparação entre as padronizações da (IEEE, 2014) e da (ANEEL, 2016) está ilustrada na Figura 8. A seguir, são explanadas todas as etapas para estabelecer tal estudo: entrada de dados, agregação de fases, agregação de eventos, estratificação, avaliação dos afundamentos de tensão e análise comparativa.

### **3.2.1 Entrada de Dados**

A entrada de dados deve conter os resultados da monitoração de afundamentos de tensão no período analisado. Cada evento deve possuir: data/hora do distúrbio, magnitude (p.u), duração (s) e nível de medição (caso a análise seja realizada em mais de um nível de tensão).

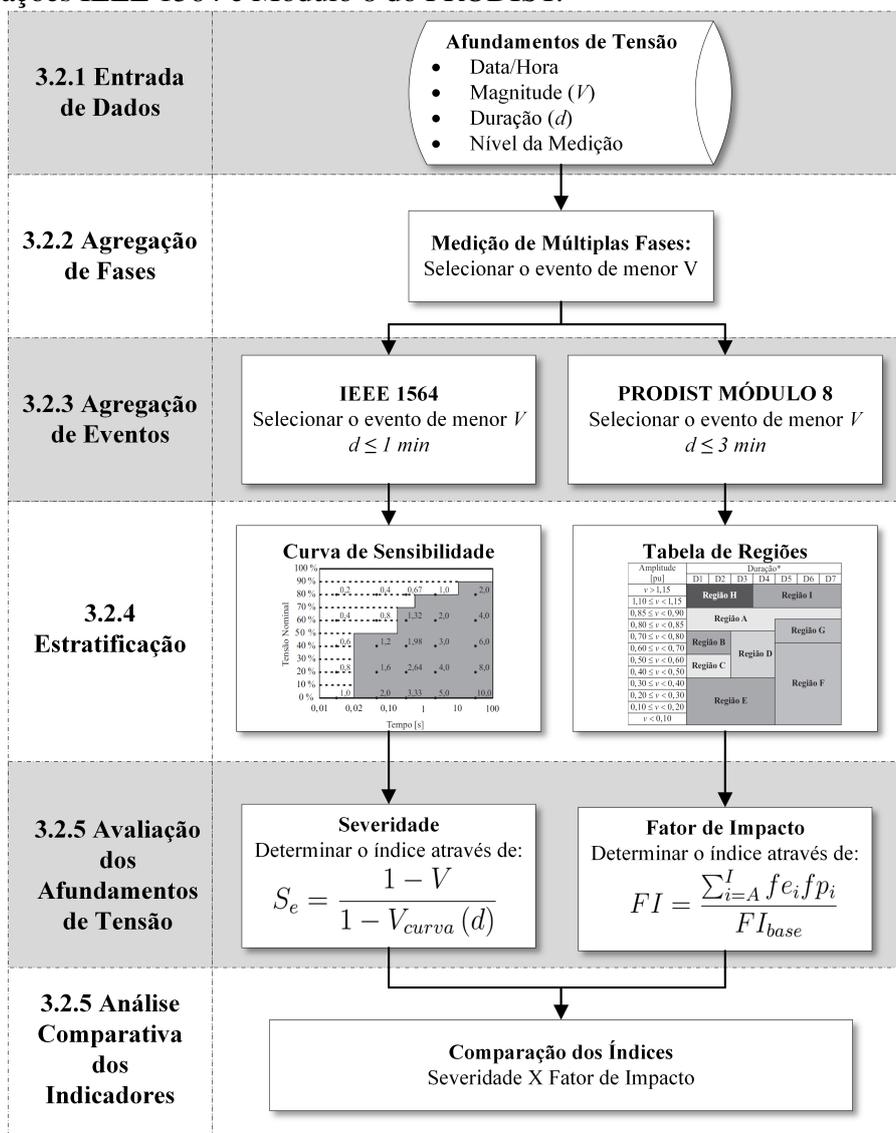
### **3.2.2 Agregação de Fases**

Durante um evento, os instrumentos de monitoramento poderão registrar afundamentos em uma fase, por exemplo, ou detectar afundamentos em mais de uma fase. No segundo caso, a padronização do IEEE recomenda representar as medições de múltiplas fases com apenas uma medida, utilizando a fase de maior desvio em relação a tensão nominal. Além disso, cita a agregação espacial para encontrar o pior afundamento de tensão em mais de um ponto de monitoramento, permitindo que múltiplos medidores monitorem apenas uma fase.

De forma análoga, a ANEEL estabelece agregação dos parâmetros de amplitude e duração de cada evento. A agregação de fases se dá com a utilização de um único evento no ponto de monitoração, em que para o afundamento de tensão, é empregada a menor amplitude durante o evento. Essa duração é definida como o intervalo de tempo decorrido entre o instante em que o primeiro evento transpõe determinado limite e o instante em que o último evento retorna para esse limite, não ultrapassando o período de três minutos.

Assim, a ANEEL apresenta duas maneiras de realizar a agregação, ambas são feitas pelo critério da união das fases. Uma delas é a agregação por parâmetros críticos, onde a duração do evento é definida como a máxima duração entre as três fases e o valor de

Figura 8: Metodologia proposta para a quantificação dos afundamentos e comparação das padronizações IEEE 1564 e Módulo 8 do PRODIST.



Fonte: O autor, 2018.

magnitude que mais se distanciou da tensão de referência. A outra maneira é a agregação pela fase crítica, em que a duração do evento é definida como a duração do evento de amplitude crítica, ou seja, a amplitude mínima do afundamento.

### 3.2.3 Agregação de Eventos

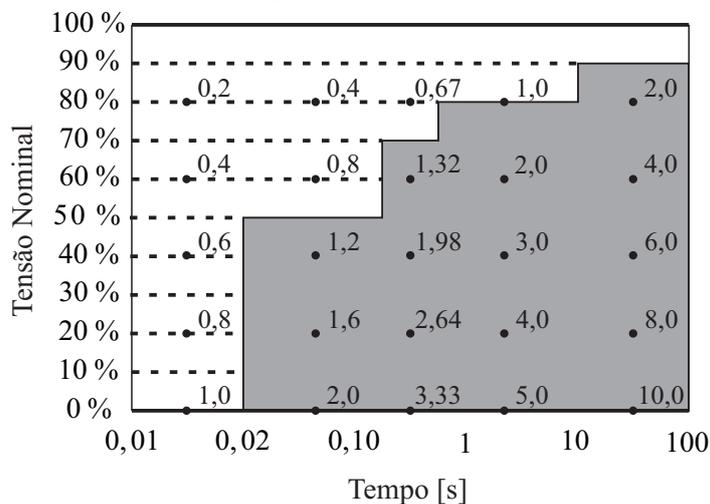
Para o padrão IEEE 1564, se houver uma sucessão de eventos no mesmo local, a agregação é realizada considerando um único evento, durante o limite de tempo de um minuto, utilizando o menor valor da tensão de magnitude.

Em contrapartida, para a ANEEL, eventos sucessivos no período de três minutos, em um mesmo ponto, são agregados compondo um único evento. A forma de agregação é análoga à agregação por fases, uma vez que utiliza o menor valor de tensão medido.

### 3.2.4 Estratificação

O índice da severidade do afundamento de tensão, proposto pela IEEE 1564 estratifica os eventos por meio de curvas de sensibilidade de equipamentos, como por exemplo, a CBEMA, a ITIC e a SEMI F47. Tais curvas caracterizam um evento a partir da magnitude e duração, arbitrando intervalos que estabelecem se o evento gerou um afundamento ou elevação de tensão. Fundamentalmente, o cálculo se baseia na comparação entre as tensões obtidas por uma curva de sensibilidade e a amplitude e duração de um evento computado. Conforme ilustrado na Figura 9, a região acima da curva é área de imunidade, com valores de severidade menores que 1, e eventos situados abaixo da curva (área cinza), representam as condições para possíveis falhas nos equipamentos, com valores de severidade maiores que 1.

Figura 9: Estratificação pela curva de sensibilidade SEMI F47.



Fonte: Adaptado de (IEEE, 2014).

Todavia, para o cálculo do Fator de Impacto (FI) proposto pela ANEEL, o método para estratificação usado foi baseado nos indicadores de tabelas de afundamentos de tensão. Essas tabelas são divididas em intervalos de duração e de magnitude, onde as colunas correspondem aos valores dos intervalos de duração e as linhas, aos intervalos de magnitudes. Para a estratificação dos parâmetros, a ANEEL propõe a Tabela 8, com regiões de

sensibilidade são agrupados conforme a magnitude e a duração, representando diferentes níveis de impacto.

Tabela 8: Estratificação em regiões de sensibilidade proposta pela ANEEL.

Amplitude [pu]	Duração						
	[16,67 ms - 100 ms]	(100 ms - 300 ms]	(300 ms - 600 ms]	(600 ms - 1 seg]	(1 seg - 3seg]	(3 seg - 1 min]	(1 min - 3 min)
> 1,15	Região H			Região I			
(1,10 - 1,15]	Região H			Região I			
(0,85 - 0,9]	Região A						
(0,80 - 0,85]	Região A						
(0,70 - 0,80]	Região B		Região D		Região G		
(0,60 - 0,70]	Região C				Região F		
(0,50 - 0,60]	Região C						
(0,40 - 0,50]	Região C						
(0,30 - 0,40]	Região E						
(0,20 - 0,30]			Região E				
(0,10 - 0,20]			Região E				
< 0,10	Região E						

Fonte: Adaptado de (ANEEL, 2017).

### 3.2.5 Avaliação dos Afundamentos de Tensão

Para avaliação dos afundamentos de tensão, cada método classifica o evento com índice de severidade ou fator impacto, dependendo da padronização aplicada à quantificação.

Neste cenário, o índice da severidade de um afundamento de tensão, proposto pela IEEE 1564, caracteriza o nível de impacto que certo evento causou. O limite estabelecido considera a tensão residual do evento computado e a sua duração, parâmetros estes que podem compor um gráfico comparativo às curvas de referência. Dessa maneira, a severidade do afundamento de tensão pode ser calculada por meio de (4):

$$S = \frac{1 - V}{1 - V_{curva}(d)}, \quad (4)$$

onde  $V$  é a magnitude do afundamento de tensão,  $d$  é a duração do evento e  $V_{curva}(d)$  é a magnitude da tensão na curva de referência. No caso da curva SEMI F47, a severidade do afundamento de tensão será calculada conforme a Tabela 9.

Assim, afundamentos com valor de severidade menor que um são considerados den-

Tabela 9: Cálculo da severidade do afundamento de tensão conforme a curva semi F47.

<b>Limites de Duração</b>	<b>Cálculo da Severidade</b>
$d \leq 20ms$	$S = 1 - V$
$20ms < d \leq 20ms$	$S = 2(1 - V)$
$200ms < d \leq 500ms$	$S = 3, 3(1 - V)$
$500ms < d \leq 10s$	$S = 5(1 - V)$
$d > 10s$	$S = 10(1 - V)$

Fonte: (IEEE, 2014).

tro da área de operação do equipamento, mas isso não implica que o equipamento ou o processo não será afetado. Afundamentos com severidade maior que um produzem falhas de processos. Eventos com magnitude acima do limite para afundamentos de tensão, ou seja, valores acima de  $0,9p.u.$ , terão índice de severidade zero.

Quanto ao período de monitoramento, a IEEE 1564 indica um ano, podendo-se normalizar o índice para cada caso mensal. A severidade do afundamento de tensão total (*Total Voltage Sag Severity*) é a soma da severidade para todos os eventos de afundamentos de tensão computados em um determinado local durante um determinado período de tempo. A média da severidade do afundamento de tensão (*Average Voltage Sag Severity*) é a média da severidade de todos eventos de afundamentos de tensão computados em um determinado local por um determinado período de tempo.

Analogamente, para quantificar a intensidade dos eventos tanto de afundamentos quanto de elevações de tensão, a ANEEL propôs o Fator de Impacto (FI). O cálculo de FI leva em conta um fator de ponderação correspondente para cada região de sensibilidade, com pesos definidos de acordo com os intervalos de maior incidência de problemas em processos, quando submetidos à VTCD. Por meio de um valor base, o qual analisa o nível de tensão onde o evento ocorreu, o FI é calculado segundo (5):

$$FI = \frac{\sum_{i=A}^I f e_i f p_i}{FI_{base}}, \quad (5)$$

onde  $f e_i$  é a frequência de ocorrência de eventos apurada por meio de medição apropriada, em um período de 30 dias consecutivos para cada região de sensibilidade (A, B, C, D, F, G, H e I);  $f p_i$  é o fator de ponderação para cada região de sensibilidade, estabelecido de acordo com a relevância do evento, correlacionando sua amplitude e duração; e  $FI_{base}$

é o fator de impacto base, obtido do somatório dos produtos dos fatores de ponderação pelas frequências máximas de ocorrência em um período de 30 dias para cada região de sensibilidade.

As regiões de sensibilidade mencionadas estão caracterizadas na Tabela 8, sendo que na Tabela 10, constam os valores do  $f_{pi}$  para as regiões de sensibilidade e valores de  $FI_{base}$  para diferentes níveis de tensão. O valor de referência para o índice de fator de impacto é de 1,0 p.u. para sistemas de distribuição de alta e de média tensão.

Tabela 10: Ponderação para as regiões de sensibilidade e valores de  $FI_{base}$  para diferentes níveis de tensão.

Região de Sensibilidade	Ponderação ( $f_{pi}$ )	Fator de Impacto Base ( $FI_{base}$ )	
		$1 < V_n < 69$ kV	$69 \leq V_n < 230$ kV
A	0,00		
B	0,04		
C	0,07		
D	0,15		
E	0,25	2,13	1,42
F	0,36		
G	0,07		
H	0,02		
I	0,04		

Fonte: (ANEEL, 2016).

Em relação ao período de análise, mesmo baseando-se na NRS 048, a qual estabelece um ano de monitoramento, a ANEEL propõe um período mínimo de 30 dias consecutivos de medição, não sendo impedido um tempo de monitoração maior que este. A proposta da monitoração em curto intervalo de tempo visa garantir que o consumidor industrial tenha uma resposta mais rápida acerca da qualidade de energia fornecida.

### 3.2.6 Análise Comparativa dos Indicadores

Finalizada a quantificação com os indicadores de Severidade e de Fator de Impacto, são comparados os resultados de ambos índices para mesmos períodos de análise, visando enaltecer as diferenças de classificação entre as padronizações. De tal maneira, será possível comparar as recomendações nacional e internacional, levantando as particularidades

de cada uma para os diferentes casos de afundamentos de tensão. Neste trabalho, a quantificação e a análise dos fatores foi realizada no programa MATLAB<sup>®</sup>.

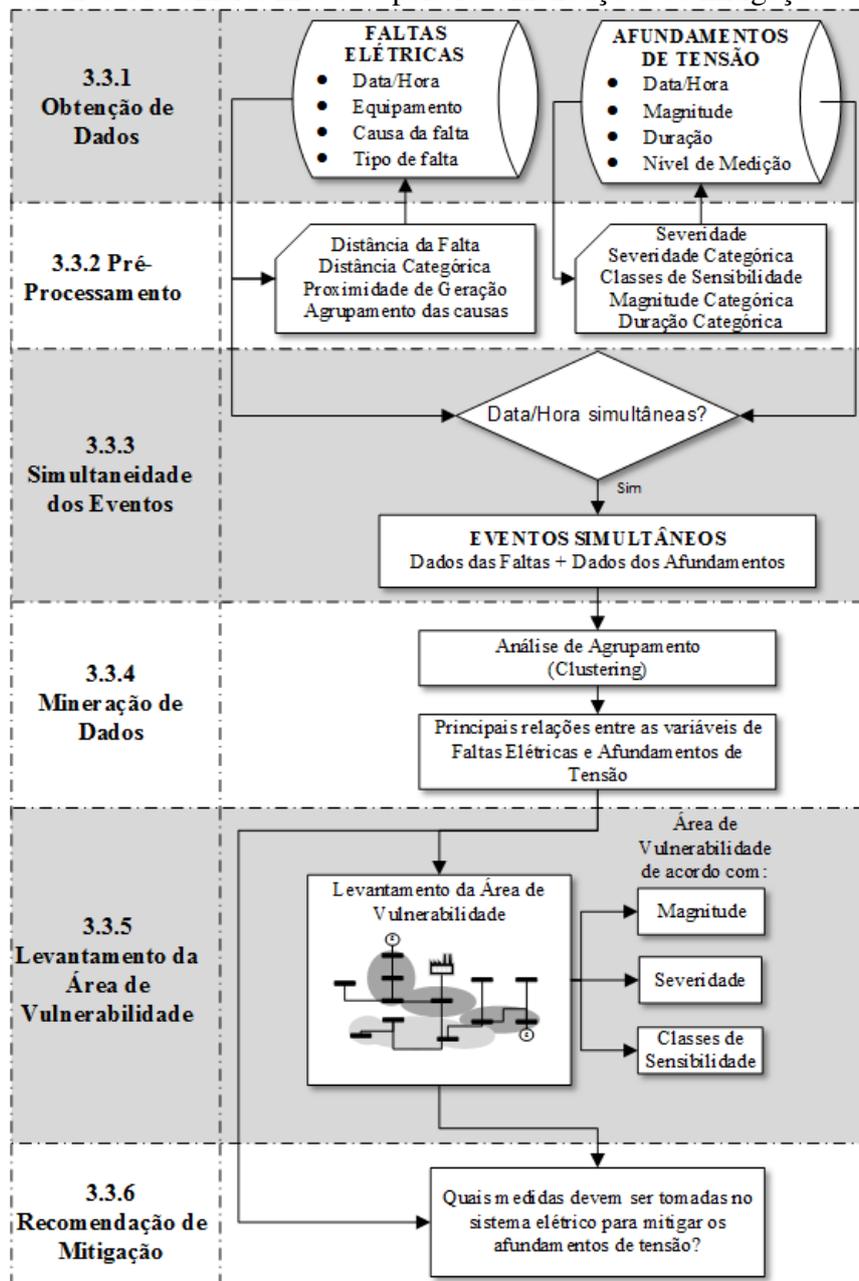
### **3.3 Proposição para Agrupamento das Principais Variáveis de Influência**

Como existe uma relação de causa-efeito entre faltas e afundamentos, é de suma importância analisar a relação de incidência de um em outro. Com o propósito de verificar a associação entre ambos, é proposta a utilização do programa *Weka*, onde são carregados os bancos de dados e, a partir dos recursos de mineração, levantados os agrupamentos entre as variáveis de cada banco na ocorrência de faltas e, conseqüentemente, de afundamentos. O pacote de *software Weka (Waikato Environment for Knowledge Analysis)* é uma coleção de algoritmos em aprendizado de máquina e mineração de dados. O pacote foi desenvolvido em Java na Universidade de Waikato na Nova Zelândia e é de livre acesso à comunidade científica (HALL et al., 2009).

No contexto de mineração de dados, análise de agrupamento, ou *clustering*, é o nome dado para o grupo de técnicas computacionais cujo propósito consiste em separar objetos em grupos, baseando-se nas características que estes objetos possuem. Segundo (TAN O.N.; STEINBACH, 2006), a ideia básica consiste em colocar em um mesmo grupo objetos que sejam similares de acordo com algum critério pré-determinado. Então, esta técnica pode ser usada para reduzir a dimensão de um conjunto de dados, reduzindo uma ampla gama de objetos à informação do centro do seu conjunto, podendo servir também para extrair características escondidas dos dados e desenvolver hipóteses a respeito de sua natureza.

Sequencialmente, a partir dos agrupamentos obtidos, são relacionadas as características de faltas de um SEP com as dos afundamentos de tensão. Além do resultado do agrupamento permitir o entendimento das causas dos afundamentos, com essas relações também será possível estabelecer a área de vulnerabilidade de acordo com os indicadores e recomendar medidas para mitigação do problema. A Figura 10 ilustra a metodologia para o desenvolvimento desta proposição. A seguir, é detalhada cada etapa do processo de descoberta de conhecimento a partir dos bancos de dados.

Figura 10: Proposição para agrupamento das principais variáveis de influência, para levantamento da área de vulnerabilidade e para recomendações de mitigação.



Fonte: O autor, 2018.

### 3.3.1 Entrada de Dados

A metodologia tem como entrada dois históricos de dados: um contendo os dados dos afundamentos de tensão no consumidor em análise (o mesmo utilizado na proposição anterior) e outro contendo as faltas elétricas do sistema no qual o consumidor está inserido. Como mencionado anteriormente, os dados dos Afundamentos de Tensão são: data/hora do distúrbio, a magnitude, a duração e o nível de medição. Já os dados das faltas elétricas são dados por: data/hora da falta, o equipamento que ocasionou a falta, a causa da falta e o tipo da falta.

### 3.3.2 Pré-processamento

A etapa de pré-processamento consiste na transformação dos dados, especificamente na categorização das variáveis, em que os dados das faltas elétricas e dos afundamentos são agrupados em categorias, de maneira a facilitar a análise. Neste contexto, vale citar que técnicas de mineração são menos efetivas quando aplicadas a uma grande quantidade de classes. Assim, com a generalização de valores e discretização das variáveis, são obtidas regras mais gerais para a caracterização dos registros (TAN O.N.; STEINBACH, 2006).

Assim, a Tabela 11 resume a transformação de variáveis realizada neste trabalho. A primeira coluna da Tabela 11 apresenta cada variável categorizada, a segunda as condições para estabelecimento da categorização e a terceira a própria categoria. A divisão foi baseada na distribuição de dados nesta pesquisa, para outros estudos é necessário levantar diferentes agrupamentos através dos novos dados coletados. Esta etapa de pré-processamento de variáveis foi realizada através do programa MATLAB<sup>®</sup>.

### 3.3.3 Simultaneidade dos Eventos

Após a etapa de pré-processamento, é testada a condição de origem dos afundamentos de tensão em relação às faltas elétricas. A correlação entre os dois eventos pode ser identificada através da simultaneidade dos eventos. Caso ambos os registros de faltas e afundamentos corresponderem à mesma data/hora, a falta elétrica naquele instante é considerada a causa da origem do afundamento de tensão. Assim, são relacionados os registros dos dois fenômenos, criando um novo banco de dados que apresenta todos os eventos simultâneos de faltas com afundamentos. De acordo com Santis et al (2018), essa

Tabela 11: Categorização das variáveis de faltas e afundamentos.

Variável	Valores ou Parâmetros	Categoria
Magnitude	$V \leq 60\%$	<i>M1</i>
	$60\% < V < 80\%$	<i>M2</i>
	$80\% \leq V < 90\%$	<i>M3</i>
Duração	$d \leq 0,183s$	<i>D1</i>
	$0,183s < d \leq 0,588s$	<i>D2</i>
	$d > 0,588s$	<i>D3</i>
Distância da Falta	$L \leq 83,25km$	<i>T1</i>
	$83,25km < L \leq 185,75km$	<i>T2</i>
	$185,75km < L \leq 297,25km$	<i>T3</i>
	$L > 297,25km$	<i>T4</i>
Proximidade com a Geração	Possui conexão direta	<i>G</i>
	Não possui conexão direta	<i>NG</i>
Tipo de Falta	Fase-Terra	<i>FT</i>
	Fase-Fase ou Fase-Fase-Terra	<i>FF/FFT</i>
	Não-Identificada	<i>NI</i>
Causa da Falta	Indeterminada	<i>DI</i>
	Chuva, Temporal, Descarga Atmosférica, Umidade, Vento Forte	<i>CN</i>
	Falha em Componente Elétrico	<i>FE</i>
	Vegetação, Objetos, Aviação, Pássaros, Outros Animais	<i>AVO</i>

Fonte: O autor, 2018.

é uma forma de identificar a origem dos afundamentos, porém a monitoração de qualidade de energia necessita estar sincronizada com os registros de faltas no SEP em análise. Os bancos de dados utilizados nesta dissertação são testados em data e horário do evento na escala de hora e minuto. Embora não se tenha garantia na sincronização das medições, a eliminação da escala de segundos permite uma melhor caracterização do teste.

### 3.3.4 Mineração de Dados

Estabelecida a nova base de dados, foi realizada a mineração dos dados através do agrupamento dos registros utilizando como ferramenta de apoio o *software WEKA*. Através deste programa, é possível gerar a visualização dos dados e compreender as relações das grandezas dos afundamentos de tensão com as das faltas elétricas. Como algoritmo,

foi escolhido o *K-Means* não-supervisionado que foi proposto por (MACQUEEN et al., 1967).

O *K-Means* é um dos mais simples algoritmos de aprendizagem não-supervisionados que resolvem problemas de agrupamento. O *K-Means* é uma heurística de agrupamento não-hierárquico que busca minimizar a distância dos elementos a um conjunto de  $k$  centros dado por  $\chi = x_1, x_2, \dots, x_k$  de forma iterativa. A distância entre um ponto  $p_i$  e um conjunto de *clusters*, dada por  $d(p_i, \chi)$ , é definida como sendo a distância do ponto ao centro mais próximo dele. A função a ser minimizada então, é dada por (6):

$$d(P, \chi) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d(p_i, \chi) \quad (6)$$

O algoritmo depende de um parâmetro  $k$  (número de *clusters*) definido pelo usuário. O algoritmo do *K-Means* pode ser descrito da seguinte maneira:

**Passo 1.** Escolher  $k$  distintos valores para centros dos grupos (possivelmente, de forma aleatória).

**Passo 2.** Associar cada ponto ao centro mais próximo.

**Passo 3.** Recalcular o centro de cada grupo.

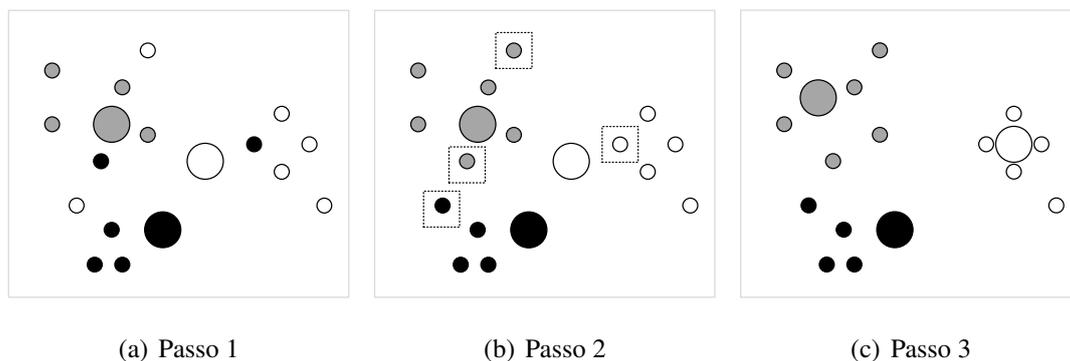
**Passo 4.** Repetir os passos 2 e 3 até nenhum elemento mudar de grupo.

Este algoritmo é extremamente veloz, geralmente convergindo em poucas iterações para uma configuração estável, na qual nenhum elemento está designado para um *cluster* cujo centro não lhe seja o mais próximo (LINDEN, 2009).

Um exemplo da execução do algoritmo de *K-Means* pode ser visto na Figura 11. Na Figura 11 (a), cada elemento foi designado para um dos três grupos aleatoriamente e os centróides (círculos maiores) de cada grupo foram calculados. Na Figura 11 (b), os elementos foram designados agora para os grupos cujos centróides lhe estão mais próximos. Na Figura 11 (c), os centróides foram recalculados e os grupos já estão em sua forma final. Caso não estivessem, os passos 1 e 2 seriam repetidos até nenhum elemento alterar de grupo.

Por fim, a partir dos resultados dos agrupamentos entre faltas elétricas e afundamentos de tensão pelo algoritmo *K-Means*, é possível determinar os principais eventos do SEP que causam afundamentos de tensão em um consumidor sensível, bem como a relação entre eles.

Figura 11: Exemplo de execução do algoritmo de K-Means.



Fonte: Adaptado de (LINDEN, 2009).

### 3.3.5 Levantamento da Área de Vulnerabilidade

A partir das relações obtidas na etapa anterior, é possível levantar a área de vulnerabilidade de afundamentos de tensão do consumidor sensível. Conforme descrito no Capítulo 2, a área de vulnerabilidade corresponde à área associada a um ponto de monitoração, onde a ocorrência de faltas elétricas nas demais barras do sistema pode ocasionar afundamentos na barra analisada abaixo de limites críticos.

Nesta dissertação, é apresentada além da área de vulnerabilidade de acordo com a magnitude, tal como proposto por (BOLLEN, 2000), também a de acordo com a severidade do IEEE e com as classes de sensibilidade da ANEEL. Conseqüentemente, tal levantamento permitirá comparar a área afetada pela magnitude dos eventos com a indicação da severidade e da classe de sensibilidade, verificando se existe uma inexatidão em utilizar somente a magnitude para caracterizar o efeito de uma falta elétrica.

### 3.3.6 Recomendações de Mitigação

Além de auxiliar no levantamento da área de vulnerabilidade, as relações entre as faltas elétricas e afundamentos de tensão permitem estabelecer medidas para mitigar a ocorrência de tais distúrbios de QEE no consumidor sensível.

Nesta pesquisa, as propostas para mitigação são provindas dos registros de faltas em equipamentos que causaram afundamentos severos ou em classes de sensibilidade com ponderação mais alta (E ou F). Assim, nesta etapa buscam-se medidas que diminuam a ocorrência destas faltas no SEP e, por consequência, reduzam a ocorrência dos afundamentos de tensão correspondentes.

### 3.4 Proposição para Validação de um Modelo de Simulação

Uma vez que através da simultaneidade são encontradas as faltas que são consideradas como causas dos afundamentos de tensão, estes dados também serão úteis na validação de um modelo de simulação no programa ANAFAS. De maneira a executar esta validação, cada relação obtida para 230 kV foi simulada. As simulações da instalação interna do consumidor não foram executadas neste trabalho. A simulação foi baseada no dados das faltas que foram simultâneas aos afundamentos de tensão. No programa ANAFAS é requerido o equipamento faltoso (linha ou barra), a distância percentual de falta para o casos de linhas de transmissão e a resistência de falta. No histórico de faltas são fornecidos esses dados, com exceção da Resistência de Falta ( $R_F$ ).

Já que  $R_F$  não é fornecido, neste trabalho foram testados valores entre 0 e 40  $\Omega$  para a  $R_F$ . Com isso, é considerado como valor de  $R_F$  aquele que minimizar o erro relativo da magnitude simulada com a monitorada. Ressalta-se que a validação considerou o valor de pré-falta de 1 p.u. Assim, de acordo com o erro obtido entre as magnitudes simulada e monitorada, pode ser validado um modelo para um estudo preditivo dos consumidores que são conectados no nível de 230 kV do SEP em análise.

### 3.5 Considerações Finais

Nesse capítulo foram apresentadas três proposições para a análise de afundamentos de tensão em um consumidor sensível.

A primeira abordagem tratou da quantificação dos afundamentos de tensão e foram apresentados duas padronizações para tal determinação: a IEEE 1564 e a atualização do módulo 8 do PRODIST. Foram detalhadas as etapas para obter os índices únicos das padronizações, bem como levantadas as diferenças de conceitos e determinações entre ambas.

Na sequência, a segunda abordagem apresentou a busca da origem dos afundamentos de tensão através da análise de simultaneidade com as faltas elétricas no SEP ao qual a indústria está inserida. A partir do agrupamento das relações das grandezas de ambos os dois bancos, foi proposto o levantamento da área de vulnerabilidade através da magnitude, da severidade e das classes de sensibilidade. Através da obtenção de tais relações, também foi descrito como serão indicadas as medidas que devem ser tomadas no SEP para que a

ocorrência dos afundamentos de tensão em consumidor sensível seja mitigada.

Finalmente, a terceira abordagem propôs uma metodologia para validar um modelo de simulação. Dependendo do erro entre as magnitudes simulada e monitorada, um modelo do SEP pode ser validado para futuros estudos preditivos.

## **4 ESTUDO DE CASO E RESULTADOS**

### **4.1 Considerações Iniciais**

No capítulo anterior foram apresentadas metodologias para a quantificação de afundamentos de tensão e para o agrupamento das variáveis de faltas elétricas com as de afundamento de tensão.

A fim de realizar um estudo de caso, a seguir é descrita a indústria na qual a qualidade de energia foi monitorada, bem como o SEP no qual este consumidor sensível está conectado.

Além das descrições dos dados utilizados, também são apresentados os resultados e as discussões relativas à quantificação dos eventos e à comparação das padronizações, à análise das variáveis de influência, ao levamento da área de vulnerabilidade, às recomendações de mitigação e à validação de um modelo de simulação.

### **4.2 Descrição da Indústria e do SEP**

A Figura 12 ilustra o diagrama unifilar simplificado da conexão do consumidor ao SEP, sendo exibidas as barras, linhas e geradores do sistema. Por questões de simplicidade, alguns pontos do SEP foram representados pelo equivalente Thévenin. Os dados elétricos do SEP estão disponíveis no ANEXO A.

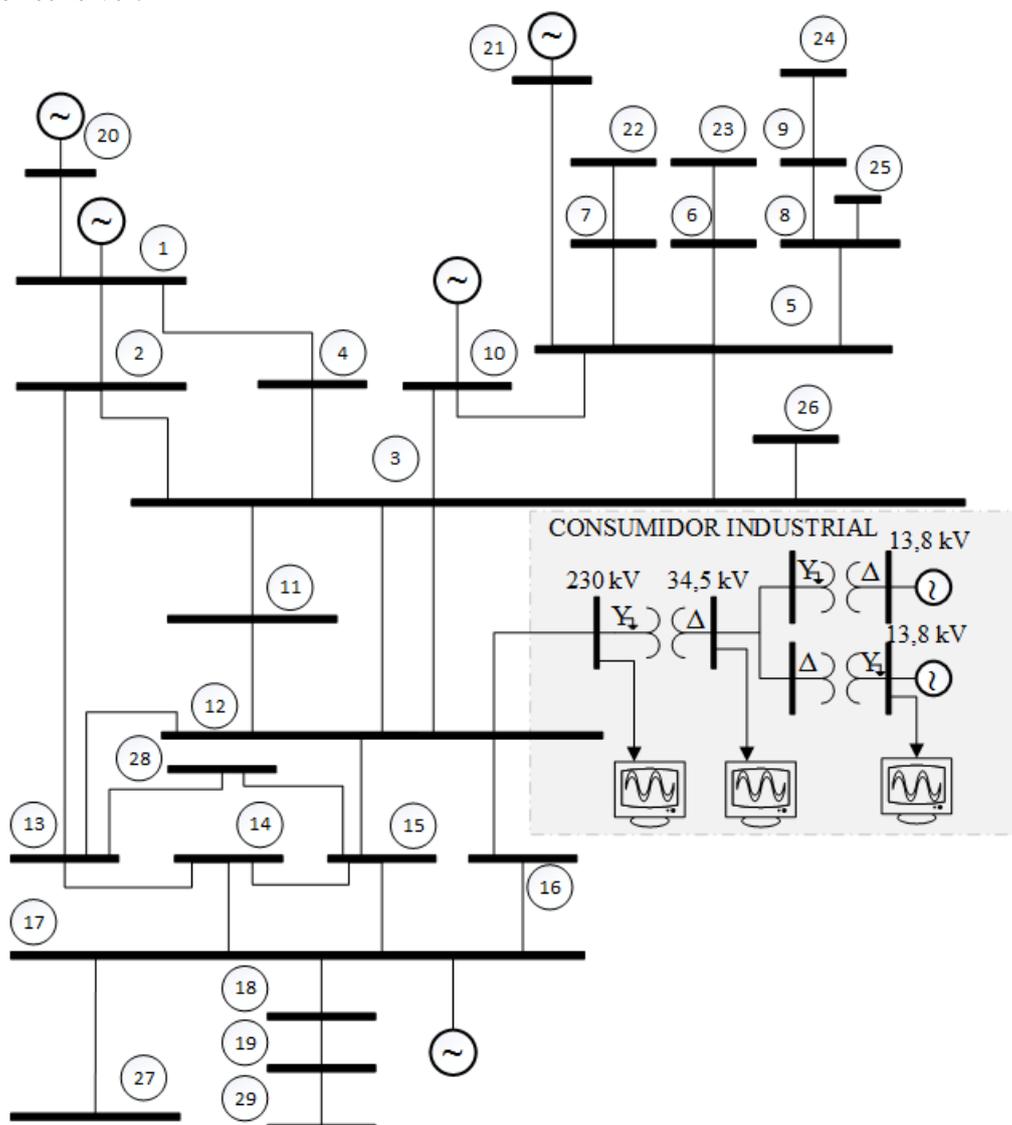
O consumidor sensível está conectado em 230 kV na barra 12 e tem a própria subestação de rebaixamento para os níveis de 34,5 kV e 13,8 kV. Adicionalmente, a indústria contém cogeração composta por cinco turbo-geradores conectados ao nível de 13,8 kV, os quais apresentam potência nominal igual a 250,99 MW.

Diante disso, a monitoração de qualidade de energia foi realizada nos três níveis de tensão através de analisadores de qualidade de energia da Schneider modelo ION8650

(SCHNEIDER, 2018) durante 24 meses. Esses analisadores realizam as medições de acordo com a IEC 61000-4-34 (IEC, 2005b) Class A/S, registrando data/hora, magnitude e duração dos eventos.

Analogamente, o histórico de faltas elétricas foi obtido a partir dos registros de falhas dos equipamentos da transmissão de energia em 230 kV para 18 meses dos dois anos de monitoração dos afundamentos.

Figura 12: Diagrama unifilar simplificado do SEP em análise com a conexão do consumidor sensível.



Fonte: O autor, 2018.

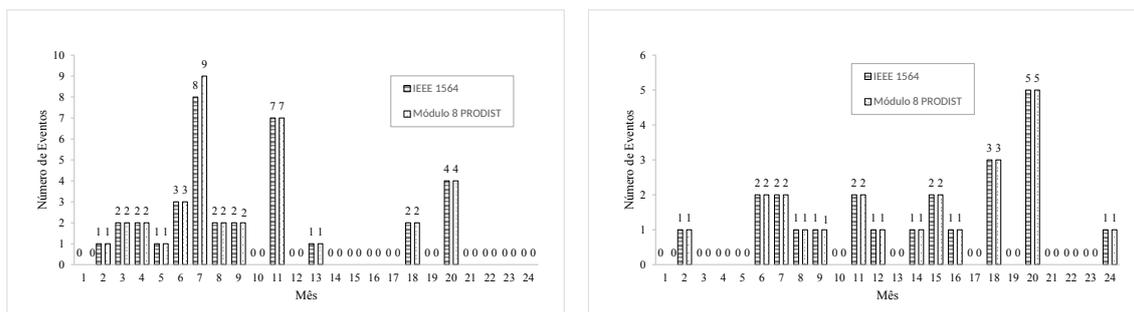
## 4.3 Resultados

### 4.3.1 Quantificação dos Afundamentos e Comparação das Padronizações IEEE 1564 e Módulo 8 do Prodist

A quantificação foi realizada aplicando a metodologia da Figura 8 aos registros de monitoração de afundamentos de tensão no consumidor industrial. O APÊNDICE A apresenta todos os registros da monitoração de tensão no período de análise.

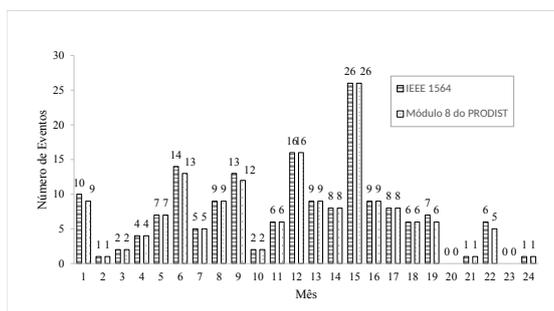
Primeiramente, com a agregação de eventos, foi possível determinar o número de ocorrências por nível de tensão. A Figura 13 apresenta a distribuição do número de eventos durante os 24 meses em cada nível de tensão monitorado, onde as barras hachuradas (escuras) indicam a quantificação pela IEEE 1564 e as pontilhadas (claras), pelo módulo 8 do PRODIST.

Figura 13: Número de eventos nos três níveis de tensão de acordo com a IEEE 1564 e módulo 8 do PRODIST.



(a) Monitoração em 13,8 kV

(b) Monitoração em 34,5 kV



(c) Monitoração em 230 kV

Fonte: O autor, 2018.

Pela Figura 13 é possível avaliar os meses com maior ocorrência de afundamentos de tensão para cada nível de monitoração. Para o nível de 13,8 kV o mês mais afetado foi o

7 com 9 eventos e, na sequência, o mês 11 com 7 ocorrências. Para 34,5 kV o mês com maior incidência de afundamentos de tensão foi o 20 com 5 registros e na sequência, o mês 18 com 3 eventos. Já para 230 kV, o número de eventos foi maior no mês 15 com 26 ocorrências, na sequência o mês 12 com 16 registros, e os meses 6 e 9 ambos com 13 afundamentos.

Deste modo, o padrão do IEEE computou ao total 228 afundamentos no período de 2 anos, distribuídos nos três níveis de tensão da seguinte forma: 35 em 13,8 kV, 23 em 34,5 kV e 170 em 230 kV. Em contrapartida, o padrão da ANEEL apresentou 224 afundamentos de tensão no mesmo período, sendo 36 em 13,8 kV, 23 em 34,5 kV e 165 em 230 kV. Assim sendo, a quantificação pela IEEE 1564 foi ligeiramente maior que pelo módulo 8 do PRODIST nos níveis de 13,8 kV e 230 kV.

Neste enquadramento, de acordo com a Figura 13 (a), é notado que o mês 7 foi o que apresentou diferenças na quantificação no nível de 13,8 kV. Assim como, pela Figura 13 (c), é observado que os meses 1, 6, 9, 19 e 22 foram os que computaram números de afundamento distintos entre as padronizações. Adicionalmente, a Tabela 12 apresenta a descrição destes eventos que foram quantificados diferentemente por cada padronização.

Em relação ao nível de 13,8 kV, pela Tabela 12, é notada que a diferença no mês 7 é devida ao registro de um afundamento com duração de 134,704 s. A quantificação divergente das padronizações é resultante da definição de afundamentos de tensão; já que a IEEE 1564 considera eventos com duração de até um minuto, e o módulo 8 do PRODIST de até três minutos. Como a duração do evento é maior que 60 s, a padronização do IEEE não quantificou tal evento como afundamento de tensão.

Todavia, para o nível de 230 kV, a diferença de quantificação entre as padronizações foi resultante da janela de agregação dos eventos. Na Tabela 12 os eventos dos meses 1, 6, 9, 19 e 22 em 230 kV foram agregados distintamente entre a padronização da ANEEL e a do IEEE. No mês 1 a diferença foi resultante de dois registros de afundamentos em um período de 2 minutos. Como a agregação da ANEEL é realizada a cada 3 minutos e a do IEEE a cada 1 minuto, a primeira registrou apenas um evento para este intervalo, enquanto a segunda registrou dois. No mês 6, novamente a agregação pelo IEEE computou um evento a mais, devido a ocorrência de dois afundamentos em um período de 110 s. No mês 9, a ocorrência de dois eventos em um período de 93 s também fez a IEEE 1564 quantificar um afundamento a mais do que o módulo 8 do PRODIST. No meses 19 e 22, a

Tabela 12: Eventos com diferente quantificação pelas padronizações.

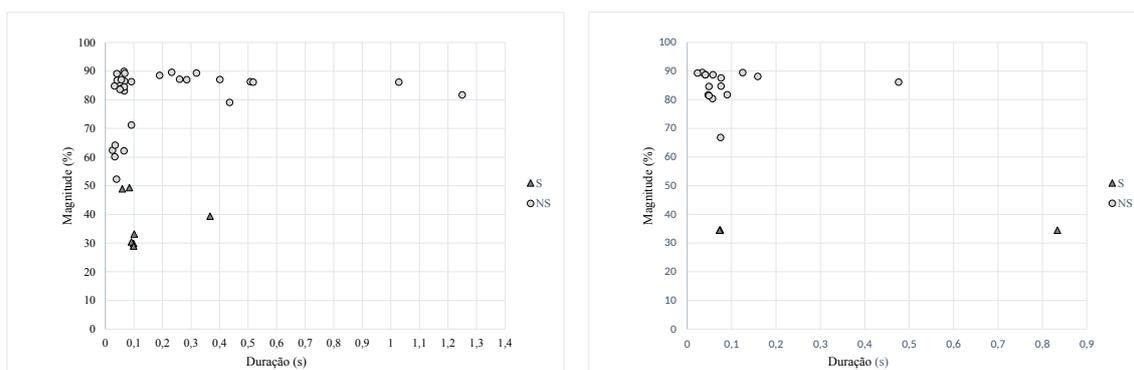
Nível	Mês	Eventos com diferente quantificação	Quant. pela ANEEL (n eventos)	Quant. pelo IEEEE (n eventos)
13,8 kV	7	Dia:17 Hora: 10:01:52 Magnitude: 86,9% Duração: 134,704s	0	1
230 kV	1	Dia:2 Hora: 22:19:05 Magnitude: 88,3% Duração: 0,032 s	1	2
		Dia:2 Hora: 22:21:10 Magnitude: 89,26% Duração: 0,215 s		
	6	Dia:14 Hora: 22:28:08 Magnitude: 69,2% Duração: 0,091 s	1	2
		Dia:14 Hora: 22:29:58 Magnitude: 70,3% Duração: 0,058 s		
	9	Dia:25 Hora: 12:27:07 Magnitude: 74,8% Duração: 0,117 s	1	2
		Dia:25 Hora: 12:28:40 Magnitude: 85,7% Duração: 0,117 s		
	19	Dia:25 Hora: 00:15:09 Magnitude: 89,1% Duração: 0,033 s	1	2
		Dia:25 Hora: 00:18:04 Magnitude: 87,6% Duração: 0,035 s		
	22	Dia:18 Hora: 20:25:48 Magnitude: 80,1% Duração: 0,083s	1	2
		Dia:18 Hora: 20:27:13 Magnitude: 83,3% Duração: 0,334s		

Fonte: O autor, 2018.

justificativa para a diferença também foi a mesma, já que foram registrados dois eventos em cada mês em períodos de, respectivamente, 178 s e 85 s.

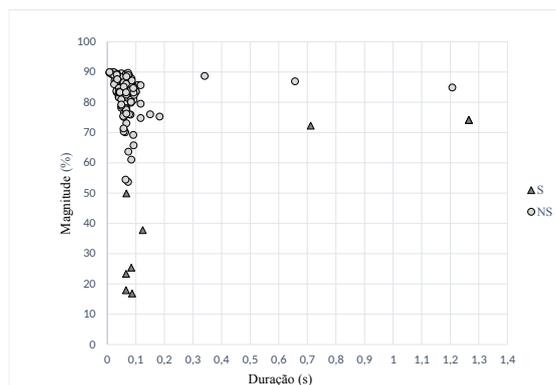
Na sequência, a Figura 14 apresenta a distribuição dos afundamentos de tensão em um plano de duração versus magnitude. Como a IEEE 1564 apresentou uma quantificação maior que a do PRODIST, os eventos plotados nas Figuras 14 (a), (b) e (c) são referentes a estratificação desta padronização. Assim sendo, cada figura representa um nível de tensão e cada ponto indica um registro de afundamento, em que os círculos indicam afundamentos com  $S < 1$  e os triângulos com  $S \geq 1$ . Já nas Figuras 15 e 16 é apresentada a porcentagem acumulada de eventos em faixas de, respectivamente, 10% na magnitude e 0,1 s na duração para cada nível de tensão.

Figura 14: Resultados da monitoração nos três níveis de tensão.



(a) Monitoração em 13,8 kV

(b) Monitoração em 34,5 kV



(c) Monitoração em 230 kV

Fonte: O autor, 2018.

Analisando a Figura 14 (a), é notado que no nível de 13,8 kV foram registrados eventos severos com  $M < 50\%$  e com  $0 < d < 0,5s$ . A partir da Figura 15 (a), é identificado que afundamentos nessa faixa de magnitude foram registrados em 18% dos casos. Bem

como, pela Figura 16 (a), que esta faixa de duração foi encontrada em torno de 88% dos casos.

Em 34,5 kV, os eventos com  $S > 1$  foram identificados em  $M < 40\%$  e  $d < 0,1s$  ou  $0,8s < d < 0,9s$ . Pela Figura 15 (b), que afundamentos nessa faixa de magnitude foram registrados em menos de 6% dos casos; e pela Figura 16 (b), que a faixas de duração menor que 0,1 s representam 80% dos casos e que entre 0,8 e 0,9 s em praticamente todos os casos.

Por fim em 230 kV, os eventos com  $M < 50\%$  e  $d < 0,2s$  foram classificados como severos. Assim como, afundamentos com  $M$  ligeiramente maior que 70% e com  $0,7s < d < 0,8s$  ou  $1,2s < d < 1,3s$ . Pelas Figura 15 (c) e 16 (c) nota-se que afundamentos com magnitude menor que 50% e com duração menor que 0,2 são encontrados em menos do que 5% de todos os casos. Também é possível verificar que afundamentos em torno de 70% de magnitude e com duração entre 1,2 s e 1,3 representam menos de 10% de todos os registros.

Através da distribuição da magnitude e da duração, os eventos foram estratificados. A Figura 17 apresenta o número de eventos severos identificados pela IEEE 1564 e o número de eventos situados nas regiões E e F do módulo 8 do PRODIST (regiões com maior ponderação). As Tabelas 13, 14, 15 detalham a diferença na estratificação mensal entre ambas as normatizações. Nas tabelas, a primeira coluna indica o mês analisado; as colunas NS e S indicam o número de eventos não-severos e severos para o mês; as colunas com as letras de A a I indicam o número de eventos em cada classe de sensibilidade do PRODIST. O APÊNDICE B apresenta a estratificação incluindo os casos não-severos e as demais classes de sensibilidade.

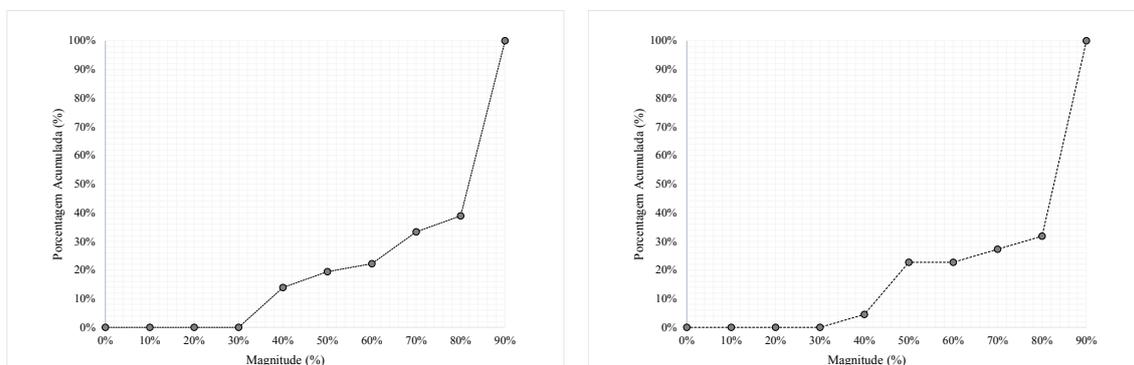
Para o nível de 13,8 kV os meses 4, 11, 20 apresentaram respectivamente 11, 5 e 1 eventos severos. A estratificação da ANEEL identificou registros nas regiões de maior ponderação somente para o mês 11. Pela Tabela 13, é possível notar que em 13,8 kV os meses 4 e 20 tiveram a classificação do evento severo na região C do PRODIST.

Tabela 13: Diferença na estratificação mensal de ambas Padronizações - Nível de 13,8 kV

Mês	NS	S	A	B	C	D	E	F	G	H	I
4	1	1	0	0	2	0	0	0	0	0	0
20	3	1	3	0	1	0	0	0	0	0	0

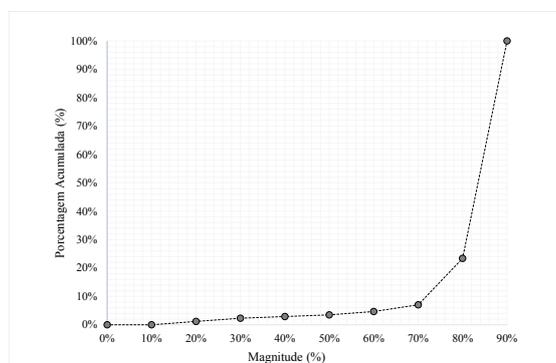
Fonte: O autor, 2018.

Figura 15: Porcentagem acumulada da magnitude dos afundamentos nos três níveis de tensão.



(a) Monitoração em 13,8 kV

(b) Monitoração em 34,5 kV



(c) Monitoração em 230 kV

Fonte: O autor, 2018.

Em 34,5 kV o mês 20 apresentou 5 afundamentos severos, sendo estes eventos também classificados nas regiões E e F do módulo 8 do PRODIST. Ainda em 34,5 kV, o mês 18 apresentou um único evento severo que não foi classificado em uma classe de maior ponderação da padronização da ANEEL. Pela Tabela 14, é possível notar que o evento severo está classificado na região G.

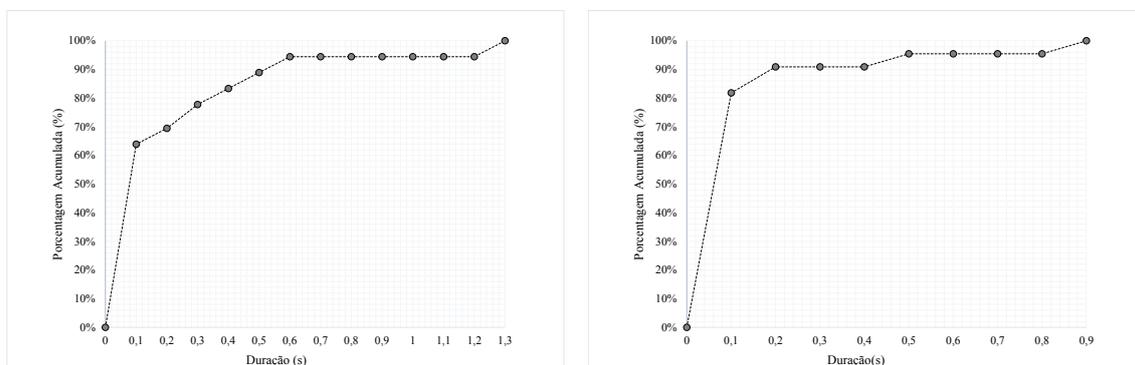
Tabela 14: Diferença na estratificação mensal de ambas Padronizações - Nível de 34,5 kV

Mês	NS	S	A	B	C	D	E	F	G	H	I
18	2	1	2	0	0	0	0	0	1	0	0
20	0	5	0	0	0	0	5	0	0	0	0

Fonte: O autor, 2018.

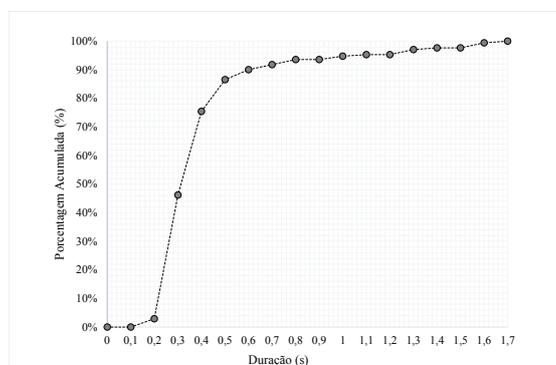
Já em 230 kV, diversos meses apresentaram eventos severos: o mês 6 apresentou 2 eventos e o meses 9, 14, 15, 16, 17 e 24 apresentaram um afundamento. A estratificação

Figura 16: Porcentagem acumulada da duração dos afundamentos nos três níveis de tensão.



(a) Monitoração em 13,8 kV

(b) Monitoração em 34,5 kV



(c) Monitoração em 230 kV

Fonte: O autor, 2018.

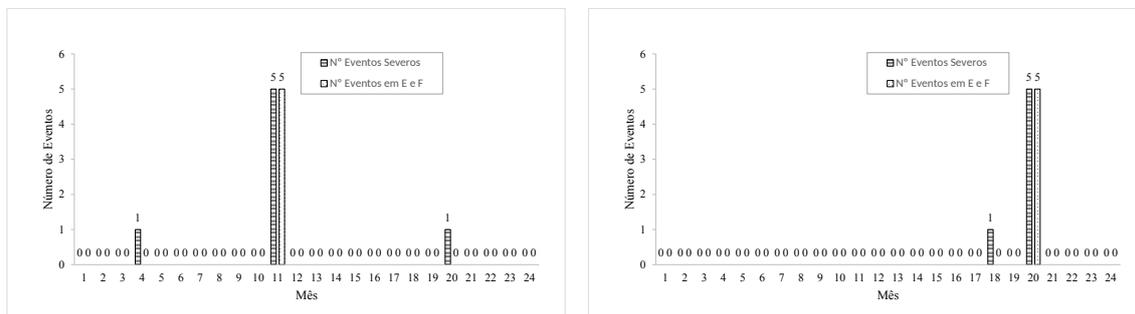
em classes de sensibilidade foi diferente para os meses 9, 15 e 17, nos quais não foram detectados eventos nas regiões de maior sensibilidade. Pela Tabela 15, é possível analisar que os eventos com severidade maior que um na região G.

Tabela 15: Diferença na estratificação mensal de ambas Padronizações - Nível de 230 kV

Mês	NS	S	A	B	C	D	E	F	G	H	I
6	12	2	4	0	0	2	0	0	0	0	0
9	12	1	8	1	0	2	0	0	1	0	0
14	7	1	7	0	0	0	1	0	0	0	0
15	25	1	23	0	1	1	0	0	1	0	0
16	8	1	7	1	0	0	1	0	0	0	0
17	7	1	6	1	0	0	0	0	1	0	0
24	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0

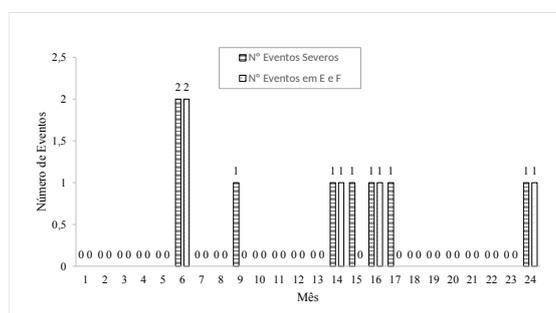
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 17: Número de eventos severos x número de eventos nas regiões E e F nos três níveis de tensão.



(a) Monitoração em 13,8 kV

(b) Monitoração em 34,5 kV



(c) Monitoração em 230 kV

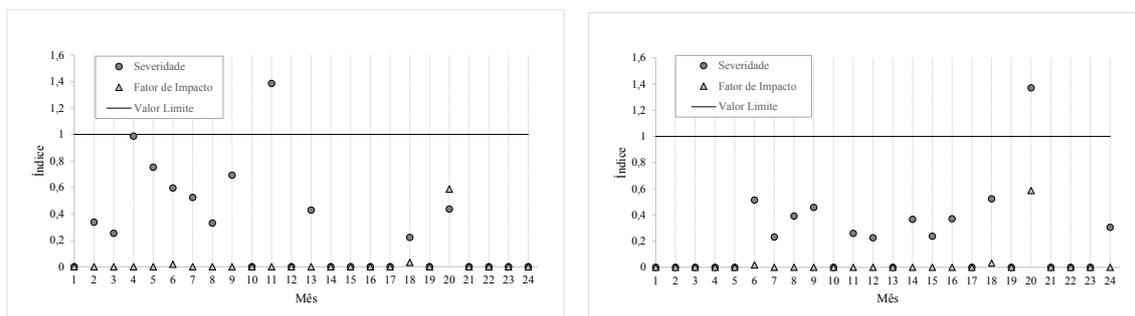
Fonte: O autor, 2018.

Através das estratificações, foram obtidos os índices mensais da severidade e do fator de impacto para cada nível de tensão. A Figura 18 apresenta os índices mensais destes indicadores para cada nível de tensão.

Analisando a Figura 18 (a), percebe-se que em 13,8 kV o único mês que apresentou severidade maior que a unidade foi o 11, no entanto o FI para o mesmo mês foi abaixo da unidade. Pela Figura 18 (b), analisa-se que no nível de 34,5 kV, somente o mês 20 foi classificado como severo, mas o FI também foi menor que o valor limite. Por fim, através da Figura 18 (c), identifica-se que para o nível de 230 kV a severidade foi excedida para último mês de monitoração e, novamente, o FI manteve-se adequado. A diferença dos indicadores em cada mês deve-se ao fato da maneira como cada um é calculado. A seguir está descrita a razão dos índices serem diferentes nestes meses para cada nível de tensão:

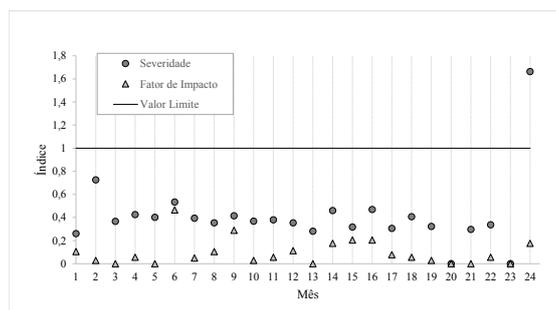
- Nível de 13,8 kV: o mês 11 apresentou severidade maior que um porque dos 7 eventos ocorridos no mês, 5 apresentaram  $S > 1$ . Assim, ao calcular o índice mensal, a média entre os 7 eventos foi maior que a unidade. Por outro lado, o cálculo do

Figura 18: Severidade e Fator de Impacto mensal nos três níveis de tensão.



(a) Monitoração em 13,8 kV

(b) Monitoração em 34,5 kV



(c) Monitoração em 230 kV

Fonte: O autor, 2018.

FI depende da estratificação dos eventos mensais, que neste caso, conforme a Tabela 1, é  $A=1$ ,  $B=1$ ,  $E=5$ . Pela Tabela 10, o valor de ponderação destas regiões é, respectivamente, 0, 0,04 e 0,25. Bem como, para este nível de tensão, o  $FI_{base}$  é 2,13. Assim, ao aplicar (5), o somatório no numerador será menor que o  $FI_{base}$ , resultando em um valor menor um.

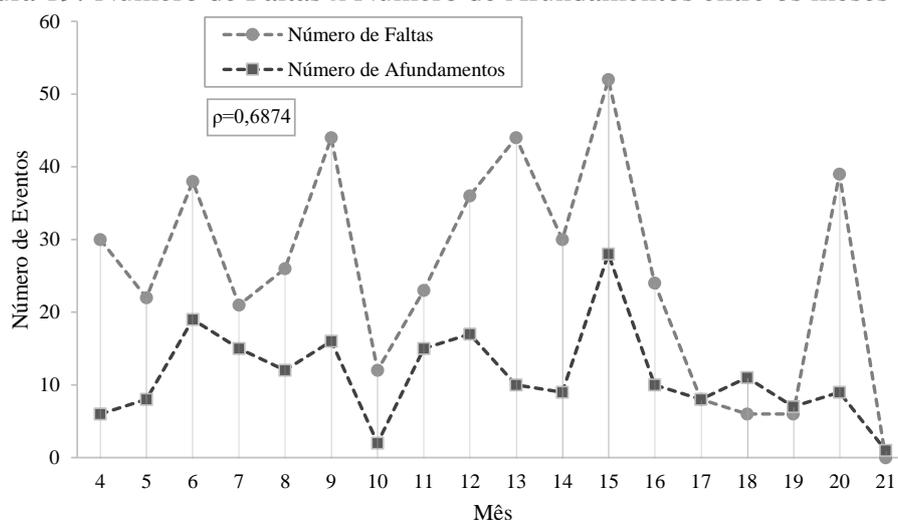
- Nível de 34,5 kV: o mês 20 apresentou severidade maior que um porque os 5 eventos ocorridos no mês apresentaram  $S > 1$ . Assim, ao calcular o índice mensal, a média entre os 5 eventos foi, obviamente, maior que a unidade. Os 5 afundamentos foram classificados pelo PRODIST como pertencentes a região E, a qual apresenta ponderação de 0,25. Embora o somatório do numerador resulte em número maior que um, já que  $5 \cdot 0,25$  resulta em 1,25, o  $FI_{base}$  neste nível de tensão também é de 2,13, resultando em um índice menor que a unidade.
- Nível de 230 kV: no mês o único afundamento ocorrido apresentou  $S > 1$ , assim, o mês foi classificado diretamente como severo, independentemente de ser uma única

ocorrência. Por outro lado, embora a estratificação da ANEEL tenha classificado tal evento na região E, e que o  $FI_{base}$  nessa região seja menor que nos níveis anteriores (1, 42), o numerador é menor que a unidade e consequentemente  $FI < 1$ .

#### 4.3.2 Análise das Variáveis de Influência de Faltas nos Afundamentos de Tensão

A metodologia apresentada na Figura 10 foi aplicada aos históricos de afundamentos de tensão e de faltas elétricas no SEP ao qual a indústria está inserida. Como as ocorrências no SEP foram obtidas somente do mês 4 ao 21, a análise foi realizada durante esse período de 18 meses. A Figura 19 apresenta a comparação do número total de afundamentos nos três níveis de tensão com o número de faltas elétricas registradas no SEP para cada mês. O índice de correlação de Pearson ( $\rho$ ) obtido entre as duas quantificações foi de 0,6874. De acordo com (MONTGOMERY; RUNGER, 2010), um  $\rho$  situado entre 0,5 e 0,7 indica uma correlação moderada entre as duas variáveis.

Figura 19: Número de Faltas x Número de Afundamentos entre os meses 4 e 21.



Fonte: O autor, 2018.

De fato, dos 203 afundamentos totais registrados no período, 140 eventos foram simultâneos as faltas elétricas. A Tabela 16 apresenta o número de afundamentos, o número de eventos relacionados e a porcentagem de relação com as faltas elétricas para cada nível de tensão. No intervalo do mês 4 a 21 foram registrados 32 afundamentos em 13,8 kV, 21 em 34,5 kV e 150 em 230 kV. No teste de simultaneidade foram detectados 9 eventos simultâneos em 13,8 kV, 26 em 34,5 kV e 105 em 230 kV. O APÊNDICE C apresenta a lista dos afundamentos de tensão relacionados com as faltas elétricas.

Os 9 eventos que ocorreram no mesmo horário no nível de 13,8 kV correspondem a 4 afundamentos, o número maior de registros deve-se ao fato da ocorrência de faltas simultâneas no SEP para esse número de afundamentos. A mesma explicação é válida para o nível de 34,5 kV, no qual os 26 eventos correspondem a 6 afundamentos, e também, para o nível de 230 kV, no qual os 105 eventos simultâneos correspondem a 76 afundamentos de tensão. Para exemplificar, a Figura 20 apresenta a ocorrência de faltas na barra 17, e com atuação da proteção de retaguarda nas linhas 17-14, 17-15, 17-16 e 17-18 com os resultantes afundamentos de tensão na indústria. Nota-se em tal figura que 5 faltas corresponderam com os afundamentos registrados nos níveis de 13,8 kV, 34,5 kV e 230 kV, justificando-se assim 5 relações para cada afundamento.

Tabela 16: Porcentagem de relação do número de afundamentos e de faltas elétricas para cada nível de tensão.

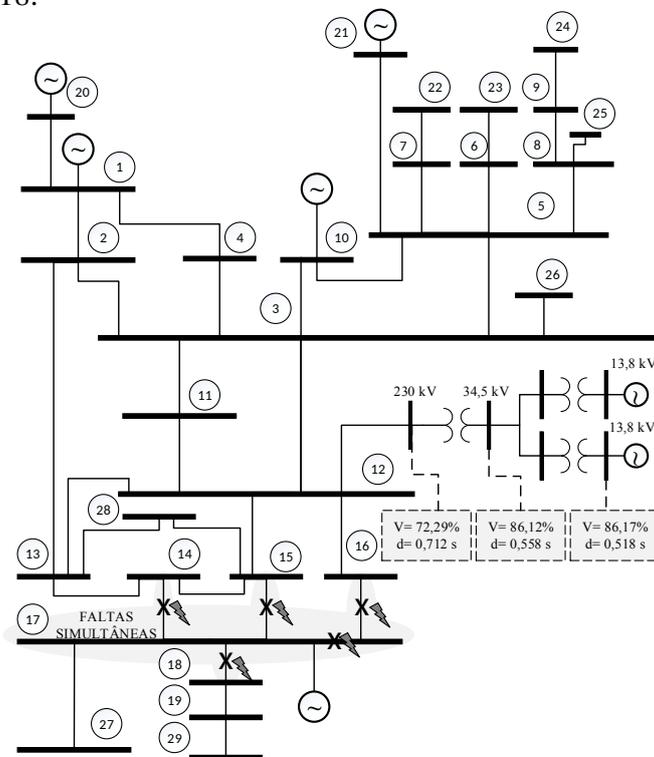
Nível de Tensão	Número de Afundamentos de Tensão (Mês 4 ao 21)	Número de Eventos Simultâneos	Porcentagem de Relação
13,8 kV	32	9 (4 afundamentos)	12,5%
34,5 kV	21	26 (6 afundamentos)	28,57%
230 kV	150	105 (76 afundamentos)	50,66%

Fonte: O autor, 2018.

Dessa maneira, foi permitido relacionar 50,66% dos afundamentos com as faltas elétricas em 230 kV, 28,57% em 34,5 kV e apenas 12,5% em 13,8 kV. A porcentagem menor de relação nos níveis de 13,8 kV e 34,5 kV é devido ao fato de que tais eventos correspondem a propagação dos afundamentos em 230 kV. Para exemplificar, a Figura 21 apresenta a propagação de uma falta elétrica na LT 16-12, que no caso foram detectados afundamentos nos três níveis de monitoração. Por outro lado, a Figura 22 apresenta o caso de um afundamento resultante no nível de 230 kV na ocorrência de uma falta elétrica na LT 1-2 para a qual não foram detectados eventos nos outros dois níveis mais baixos.

A Figura 23 apresenta as quantificações dos afundamentos de acordo com a severidade, magnitude, duração e nível de medição. As barras mais escuras indicam os eventos severos e as barras mais claras os eventos não-severos. Pela Figura 23 (b), percebe-se que afundamentos na faixa M1 ( $V < 38\%$ ) apresentaram severidade maior que 1, mas também que alguns eventos na faixa M4 ( $V > 80\%$ ) também foram classificados como

Figura 20: Afundamentos de tensão detectados nos três níveis de tensão simultâneos às faltas elétricas na barra 17 com atuação da proteção de retaguarda na LT 17-14, LT 17-15, LT 17-16 e LT 17-18.

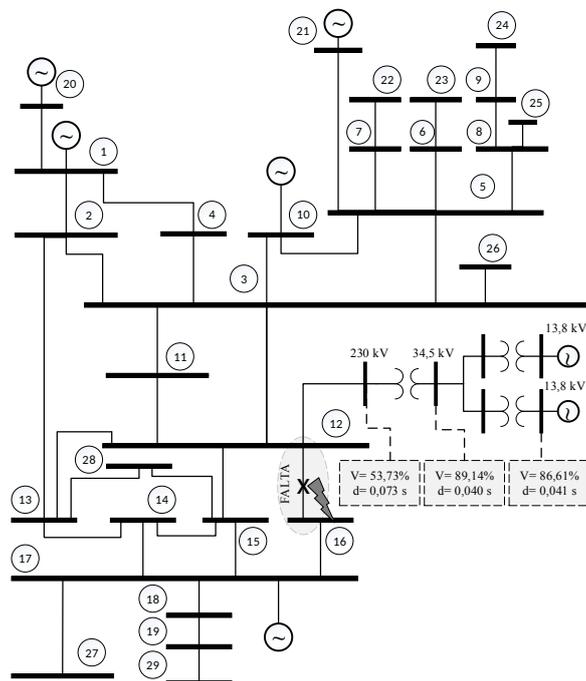


Fonte: O autor, 2018.

severos. Bem como, pela Figura 23 (c) todos os eventos no intervalo D3 ( $d > 0,58s$ ) foram classificados como severos, mas também que alguns afundamentos na faixa D1 ( $d < 0,18s$ ) também foram classificados como severos. Quanto ao nível de medição, pela Figura 23 (d) é visto que apenas os eventos de 230 kV apresentaram severidade acima da unidade.

Já a Figura 24 apresenta a relação das características das faltas elétricas (proximidade com a geração, causa da falta, tipo de falta e distância de falta) com a severidade dos afundamentos de tensão. Tal figura indica que as condições de severidade também estão distribuídas em todas as características de falta. Pela Figura 24 (a) nota-se que afundamentos severos foram oriundos de equipamentos faltosos próximos ou não de geração. A Figura 24 (b) mostra que somente faltas relacionadas a causas naturais não apresentaram eventos severos. A Figura 24 (c) indica que afundamentos severos foram originados tanto

Figura 21: Afundamento de tensão detectado em 230 kV simultâneo à falta elétrica na LT 1-2.



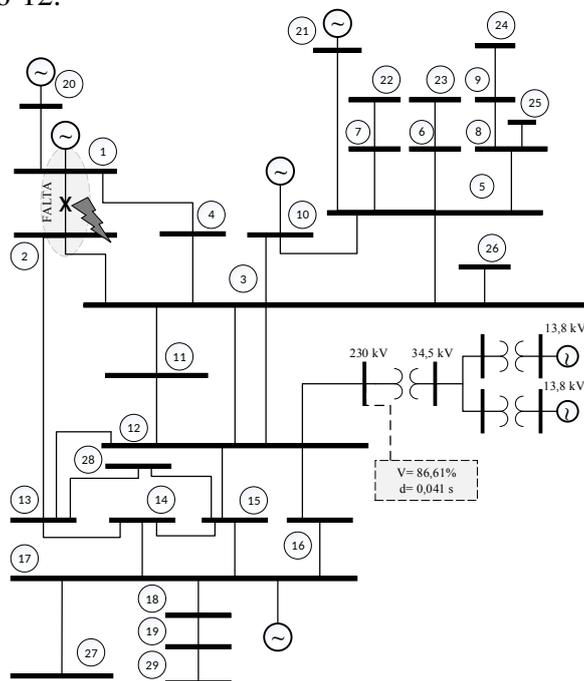
Fonte: O autor, 2018.

por faltas FT, FF/FFT ou de tipo não-identificado. A Figura 24 (d) evidencia que afundamentos severos foram originados nas proximidades do consumidor industrial, mas que também podem ser oriundos de faltas em equipamentos mais distantes ( $d > 206,53\text{km}$ ). Por fim, a Figura 24 (e) indica que os equipamentos A, D, E, F, G, H, J, K, M, N, O originaram afundamentos severos no consumidor sensível. Na Figura 24 (e) o acrônimo LT significa Linha de Transmissão; B barra; TR transformador e RE reator.

Assim, determinar a relação entre todos os parâmetros simplesmente da visualização dos dados não é uma tarefa tão simples. Com isso, a aplicação de um algoritmo de agrupamento é justificada. A partir da clusterização *K-Means* dos eventos simultâneos foi possível obter os agrupamentos para magnitude, duração, classes de sensibilidade e severidade dos afundamentos de tensão em relação aos equipamentos faltosos do SEP. Os resultados para  $k = 10$  estão mostrados no APÊNDICE D para cada característica dos afundamentos. Porém, como a ideia é avaliar os casos críticos, a Figura 25 apresenta os respectivos resultados destas análises para as condições graves de magnitude, duração, classes de sensibilidade e severidade dos afundamentos de tensão.

Pela Figura 25, os afundamentos com menor magnitude (M1) são aqueles que são

Figura 22: Afundamentos de tensão detectados nos três níveis de tensão simultâneos à falta elétrica na LT 16-12.



Fonte: O autor, 2018.

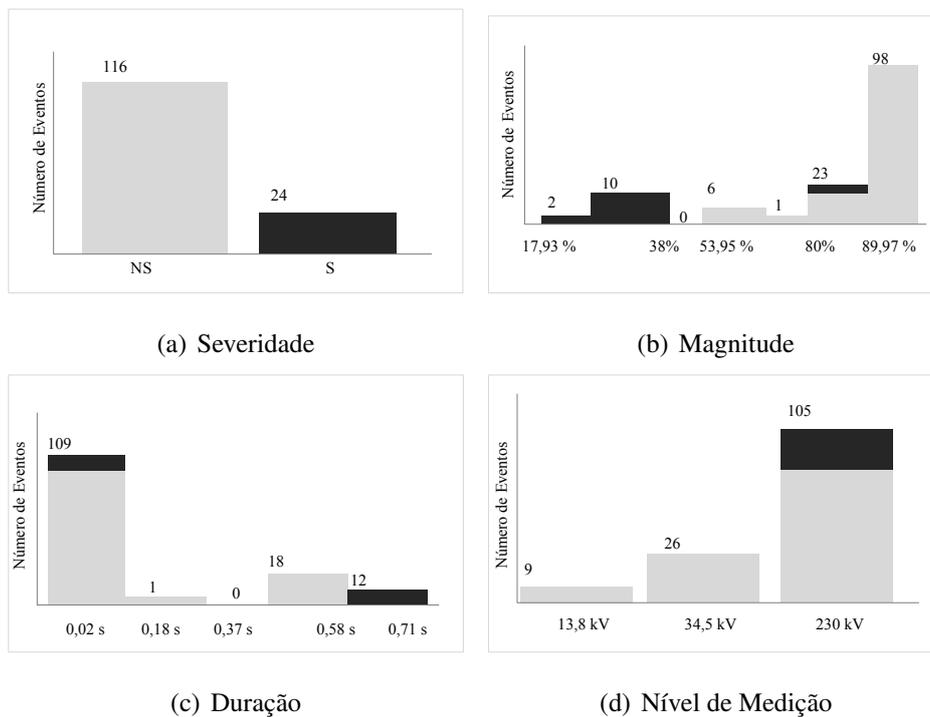
oriundos de faltas nas linhas de transmissão 3-12, 12-11, 3-11, 16-12 e na barra 11; com causas falhas nos equipamentos elétricos (FE) ou indeterminada (DI) ou por contato de animais, vegetação e objetos (AVO); e que o tipo de falta foi não-identificada (NI) ou fase-terra (FT).

Considerando apenas a duração, os afundamentos com maior duração (D3) são aqueles originados de faltas nas linhas de transmissão 17-15, 17-18, 17-16, 17-14 e na barra 17; que a causa de faltas são os equipamentos elétricos (FE); e que os tipos de faltas são fase-terra (FT), não-identificada (NI) ou fase-fase/fase-fase-terra (FF/FFT).

Assim, percebe-se que realizar a análise do efeito dos afundamentos de tensão somente por uma dessas características (magnitude e duração) é muito impreciso, pois as condições para que a magnitude seja pequena e a duração seja longa diferem. Assim, justifica-se novamente a utilização das padronizações para obter um indicador único que englobe as condições de magnitude e duração.

Assim, pela Figura 25 é possível analisar as condições que estabeleceram um afundamento na classe de sensibilidade E da padronização (ANEEL, 2016). As características das faltas que originaram afundamentos nessa faixa de classificação são as mesmas para

Figura 23: Visualização das Características dos Afundamentos de Tensão versus Severidade.



Fonte: O autor, 2018.

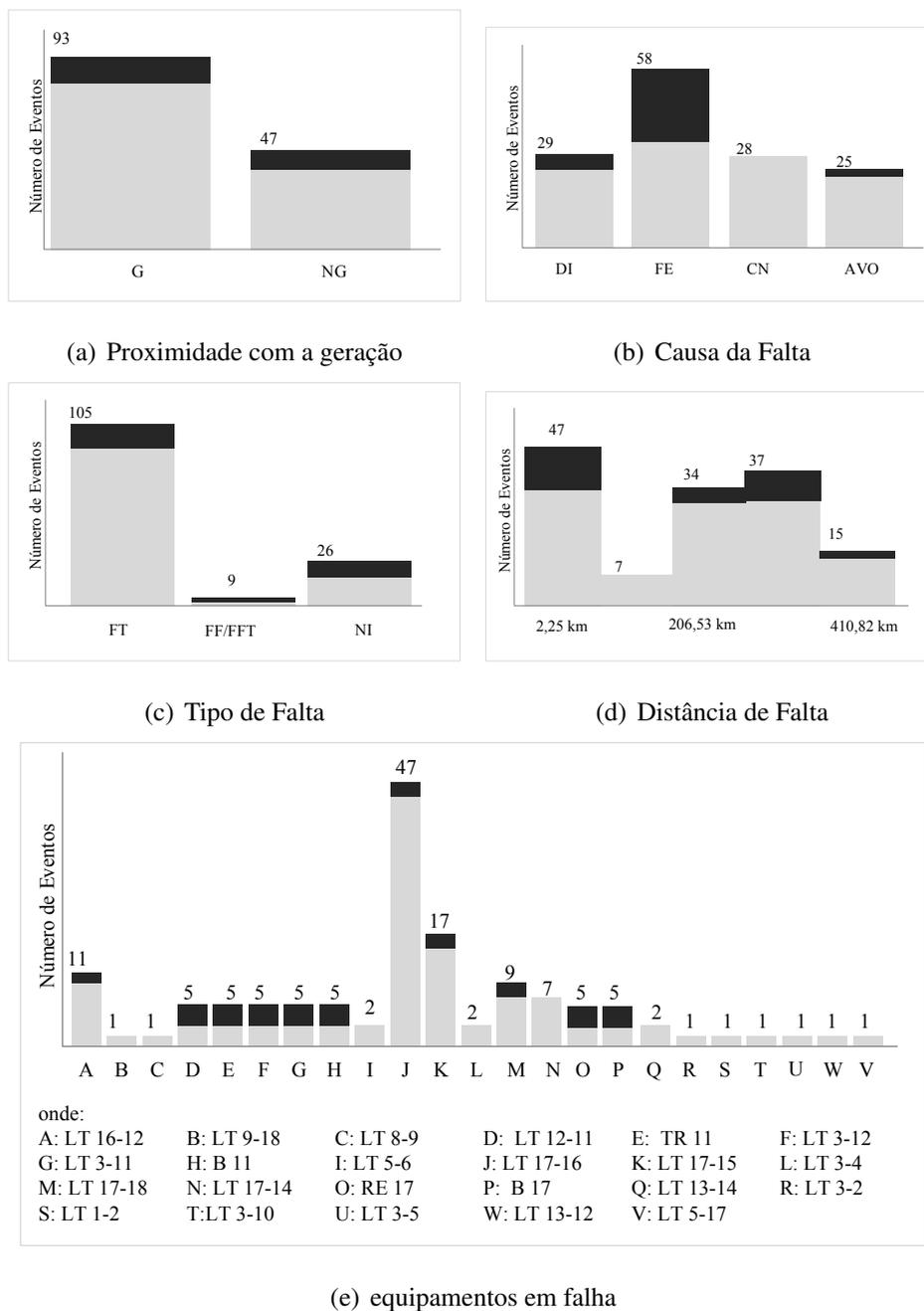
a magnitude crítica.

Por fim, o indicador de severidade englobou as características críticas de magnitude e duração (M1 e D3). Os afundamentos severos são oriundos de faltas nas linhas de transmissão 3-12, 12-11, 3-11, 16-12, 17-15, 17-18,, 17-16, 17-14 e nas barras 11 e 17; com causas faltas indeterminada (DI) ou por contato de animais, vegetação e objetos (AVO) ou por falhas nos equipamentos elétricos (FE); e os tipos de falta são fase-terra (FT), não-identificada (NI) ou fase-fase/fase-fase-terra (FF/FFT).

Na Figura 26 são mostrados os mesmos resultados do agrupamento para os casos críticos porém com a descrição dos equipamentos em falta. Assim, os equipamentos da Figura 26 foram substituídos pela distância da ocorrência de falta (classes de T0 a T3) e pela indicação se há ou não conexão direta com geração (G e NG).

Primeiramente, considerando apenas a magnitude, pode-se observar na Figura 26 que os eventos com menor magnitude (M1) são aqueles que estão próximos do consumidor (classe de distância T0 e T1); que não têm conexão direta com geração (NG). Considerando apenas a duração, as relações para a classe de maior duração (D3) são aqueles

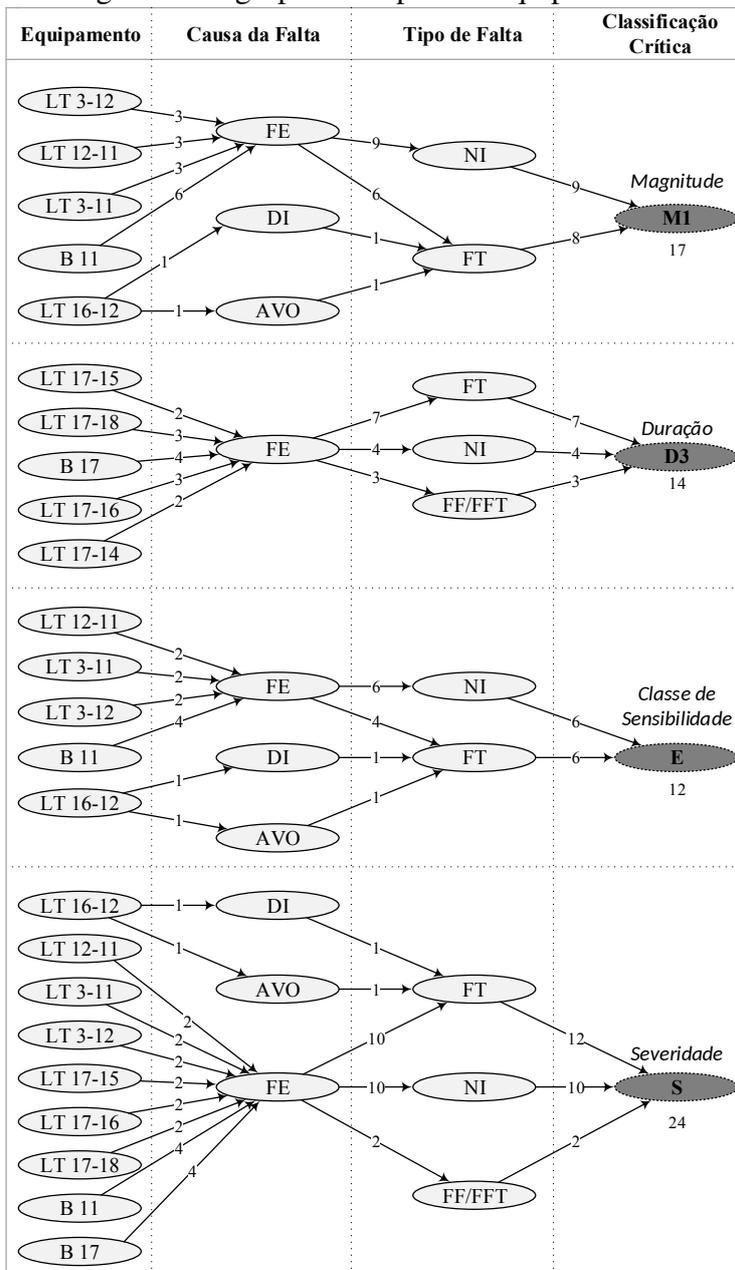
Figura 24: Visualização das Características das Falhas Elétricas versus Severidade.



Fonte: O autor, 2018.

eventos que ocorrem nas classes de distância T1 e T2; que estão conectados diretamente à geração. Ainda pela Figura 26 é possível analisar que as condições que estabeleceram um afundamento na classe de sensibilidade E da padronização (ANEEL, 2016) são as mesmas para a magnitude crítica. Por fim, o indicador de severidade englobou as características críticas de magnitude e duração (M1 e D3). Os afundamentos severos são

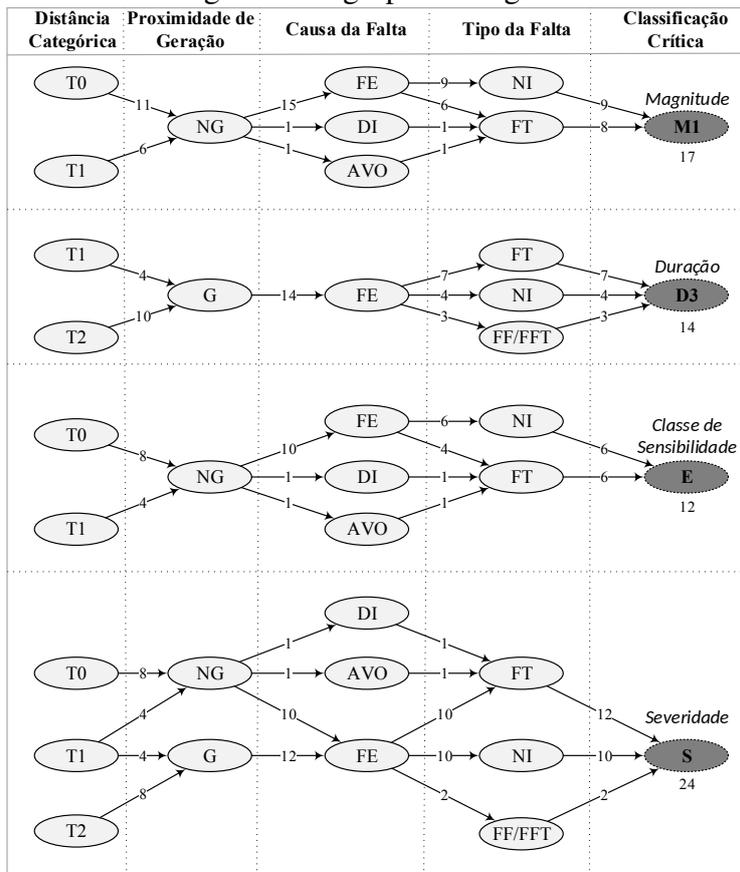
Figura 25: Agrupamento para os equipamentos.



Fonte: O autor, 2018.

causados por faltas elétricas próximas do consumidor sensível (Classes T0 e T1) ou mais distantes (classe T2); são causados por equipamentos próximos que estão ou não conectados diretamente à geração.

Figura 26: Agrupamento geral.



Fonte: O autor, 2018.

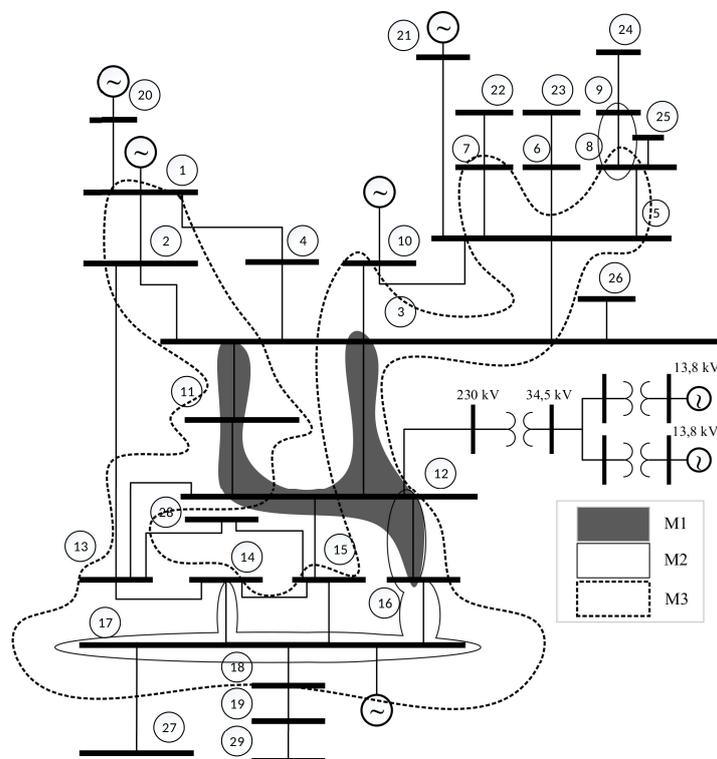
### 4.3.3 Levantamento da Área de Vulnerabilidade de Afundamentos de Tensão no SEP

A partir dos agrupamentos levantados na subseção anterior, foi possível estabelecer a área de vulnerabilidade dos afundamentos de tensão de acordo com três indicadores: magnitude, classes de sensibilidade e severidade.

A Figura 27 apresenta a área de vulnerabilidade de acordo com a magnitude dos afundamentos de tensão. A área preenchida de cinza indica a faixa M1 ( $V < 60\%$ ), que é a mais crítica para a magnitude. A área contínua indica a faixa M2 ( $60\% \leq V < 80\%$ ). E a área pontilhada indica a faixa M3 ( $80\% \leq V < 90\%$ ).

Na sequência, a Figura 28 apresenta a área de vulnerabilidade de acordo com as classes de sensibilidade do módulo 8 do PRODIST. Cada área está de acordo com a legenda a direita. Vale citar que nenhum dos 140 afundamentos foi classificado na faixa F. Assim,

Figura 27: Área de vulnerabilidade de acordo com a magnitude dos afundamentos de tensão.



Fonte: O autor, 2018.

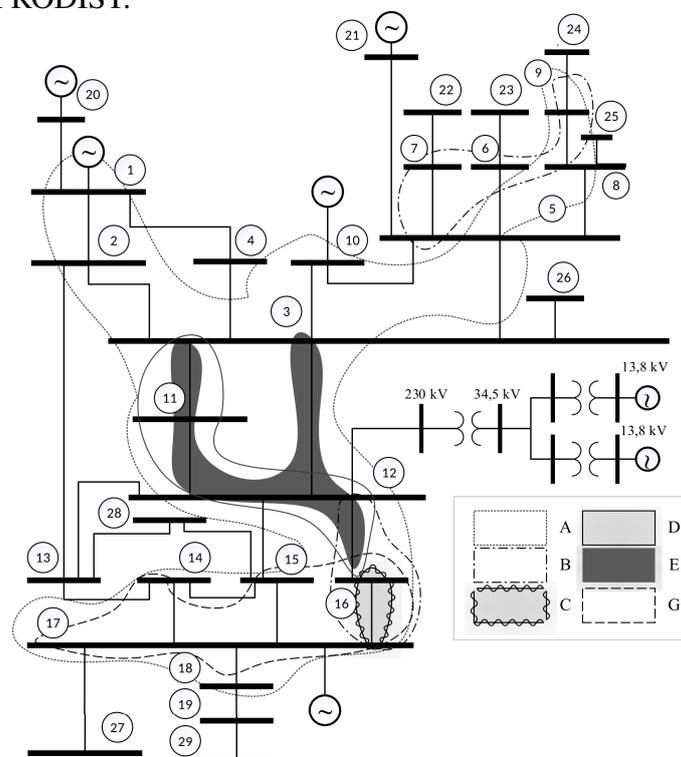
a zona mais crítica para o caso foi dos afundamentos situados na classe de sensibilidade E, que neste caso está preenchida de cinza escuro.

Por fim, a Figura 29 apresenta a área de vulnerabilidade de acordo com o indicador de severidade da IEEE 1564. A área preenchida com cinza claro indica os pontos do SEP em que a severidade foi menor que um. Por outro lado, a área em cinza escuro aponta os trechos do sistema que originaram afundamentos de tensão com severidade maior que a unidade.

Comparando as três figuras, percebe-se que o indicador de severidade informou de forma mais completa o efeito das faltas elétricas nos afundamentos de tensão. O indicador da ANEEL apresentou a mesma região crítica que somente utilizando a magnitude dos afundamentos, englobando as linhas de transmissão 16-12, 12-3, 3-11, 11-12 e a própria barra 11.

Em contrapartida, o indicador de severidade incorporou além dessa área de baixa magnitude, também sinalizou como severo os equipamentos em que a duração do afun-

Figura 28: Área de vulnerabilidade de acordo com as classes de sensibilidade definidas no módulo 8 do PRODIST.



Fonte: O autor, 2018.

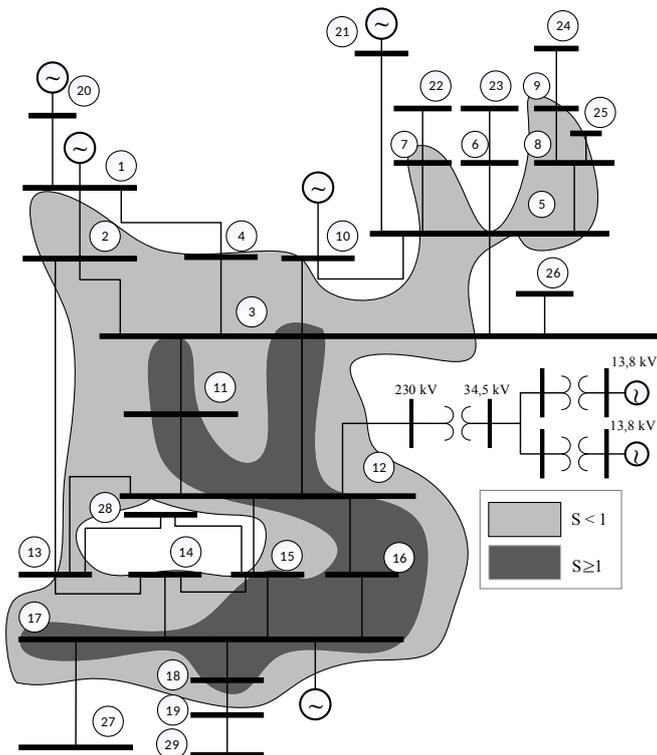
damento foi mais longa. Como levantado pelo agrupamento da Figura 25, os equipamentos que ocasionaram durações de afundamentos críticos (faixa D3) foram as linhas de transmissão 17-15, 17-18, 17-16, 17-14 e a barra 17. As classes de sensibilidade do PRODIST identificaram a região como A (ponderação *nula*), B (ponderação=0,04), C (ponderação=0,07) e G (ponderação=0,07).

Assim, com a utilização da severidade, foi possível incorporar as características de baixa magnitude e longa duração dos afundamentos em um único indicador.

#### 4.3.4 Recomendações de Mitigação

Como o indicador de severidade apresentou mais informações a respeito dos afundamentos, as recomendações de mitigação foram baseadas na área de vulnerabilidade levantada com tal índice. Pelo agrupamento da Figura 25 e pelo levantamento da Figura 29, é notado que os seguintes equipamentos originaram afundamentos de tensão severos no consumidor sensível: LT 16-12, LT 12-11, LT 3-11, LT 3-12, LT 17-15, LT 17-16, LT 17-

Figura 29: Área de vulnerabilidade de acordo com o indicador de severidade.



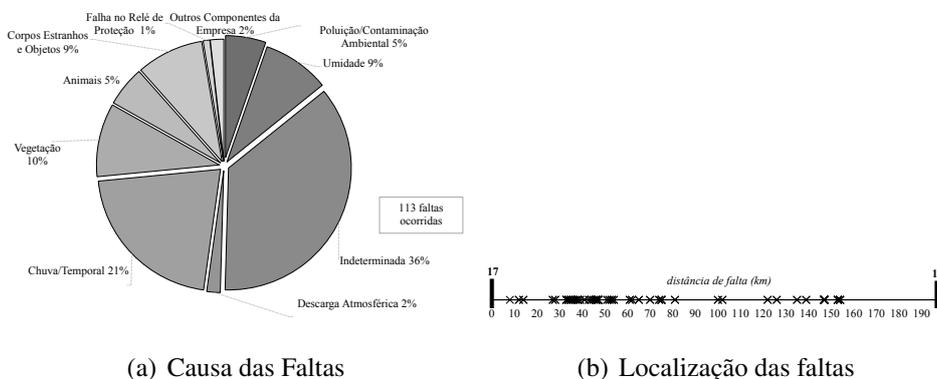
Fonte: O autor, 2018.

18, B 11 e B 17. No agrupamento da Figura 29 consta as principais causas das faltas que originaram afundamentos severos (indeterminada, contato de animais/vegetação/objetos e falhas elétricas). Porém, para uma melhor recomendação de mitigação, é importante analisar quais foram as principais causas e a localização de todas as faltas em cada um destes equipamentos do SEP. A seguir são detalhadas as ocorrências para as linhas e barras que afetaram a indústria.

A Figura 30 (a) apresenta as causas das faltas na linha de transmissão 17-16. A principal causa foi indeterminada com 36%. Causas naturais foram divididas em chuva/temporal com 21%, umidade com 9%, poluição ambiental com 5% e descarga atmosférica com 2%. Casos de contatos de vegetação, animais e corpos estranhos ou objetos representaram 24% das causas. Faltas em outros componentes da empresa, ou seja que causaram a operação da proteção de retaguarda da LT 17-16, foram identificadas em 2% das falhas na linha. Por fim, falhas no relé de proteção representam 1% das causas. A Figura 30 (b) indica a localização das 113 faltas ocorridas na linha de transmissão 17-16. As faltas foram distribuídas em praticamente até 150 km da linha. Uma maior concentração de faltas é notada

no trecho de 30 km a 50 km da LT.

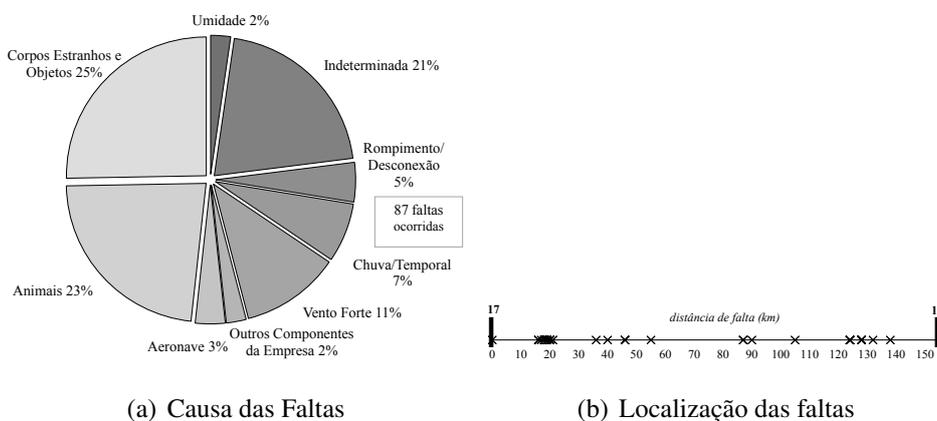
Figura 30: Causas e localização das faltas na linha de transmissão 17-16.



Fonte: O autor, 2018.

A Figura 31 (a) apresenta as causas das faltas na linha de transmissão 17-15. A principal causa foi de contatos de corpos estranhos ou objetos, animais e aeronaves na linha, representando 51% dos casos. Na sequência, causas indeterminadas foram listadas em 21% dos casos. Causas naturais representaram 20%, divididas em: vento forte 11%, chuva/temporal 7% e umidade 2%. Falhas em outros componentes do SEP e rompimento da linha somaram 7% das ocorrências. De acordo com Figura 31 (b), as 87 faltas foram distribuídas em praticamente em toda linha. Uma maior concentração de faltas é notada no trecho de 10km a 20 km da LT.

Figura 31: Causa e localização das faltas na linha de transmissão 17-15.

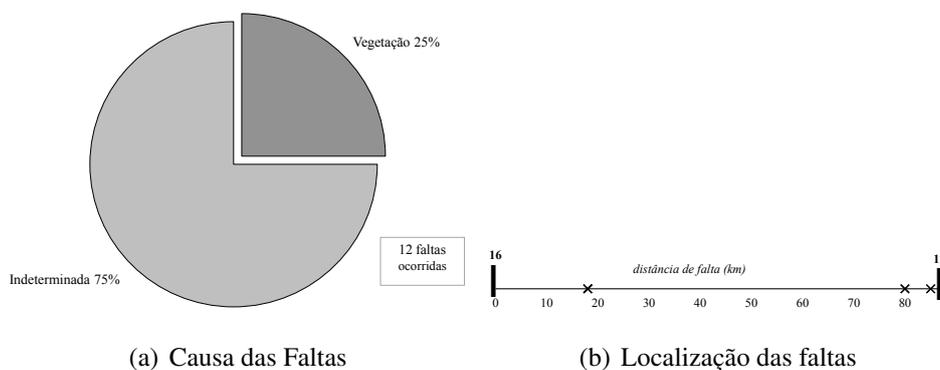


Fonte: O autor, 2018.

A Figura 32 (a) apresenta as causas das faltas na linha de transmissão 16-12. A principal causa foi indeterminada com 75%. Os outros 25% de ocorrências foram relacionadas

ao contato da linha com a vegetação. A Figura 32 (b) indica a localização das 12 faltas ocorridas na linha de transmissão 16-12. As faltas foram encontradas próximas de 20 km da linha e do trecho de 80 km até o final da LT.

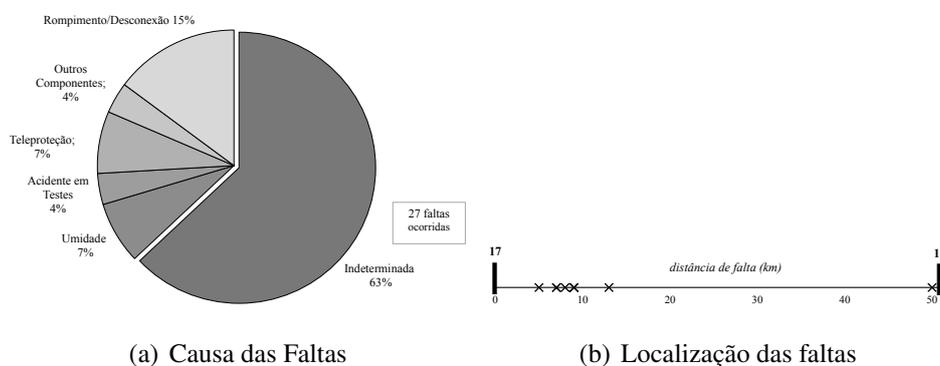
Figura 32: Causa e localização das faltas na linha de transmissão 16-12.



Fonte: O autor, 2018.

A Figura 33 (a) apresenta as causas das faltas na linha de transmissão 17-18. A principal causa foi indeterminada com 63%. Os outros 25% de ocorrências foram relacionadas contato da linha com a vegetação. Na sequência rompimento/desconexão da linha representaram 15%; umidade 7%; falhas na teleproteção 7%; acidente em testes 4%; falhas em outros componentes 4%. A Figura 33 (b) indica a localização das 27 faltas ocorridas na linha de transmissão 16-12. As faltas foram encontradas próximas do trecho de 10 km e no final da LT.

Figura 33: Causa e localização das faltas na linha de transmissão 17-18.

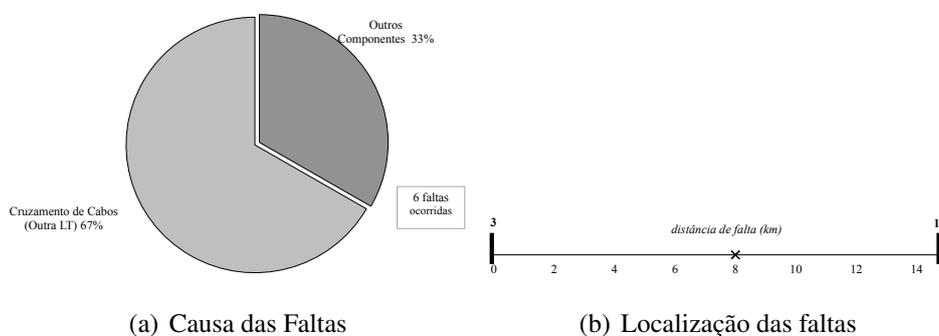


Fonte: O autor, 2018.

A Figura 34 (a) apresenta as causas das faltas na linha de transmissão 3-11. As 6 faltas ocorridas foram relacionadas pelo cruzamento de outras linhas em LT 3-11 e pela

atuação da proteção de retaguarda (acionada por outros componentes do SEP). O ponto de ocorrência das falhas causadas pelo cruzamento de outras linhas foi no trecho de 8 km.

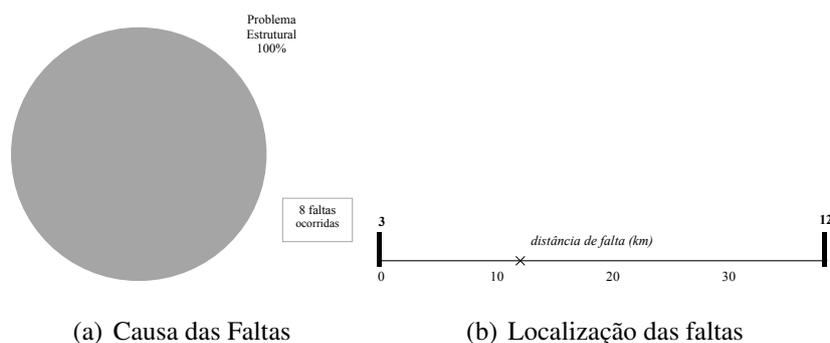
Figura 34: Causa e localização das falhas na linha de transmissão 3-11.



Fonte: O autor, 2018.

A Figura 35 (a) e a Figura 36 (a) apresentam as causas das falhas na linha de transmissão 3-12 e 12-11. Em ambas as linhas, as 8 faltas ocorridas foram relacionadas a problemas estruturais. Pela Figura 35 (b), é identificado que destas ocorrências para a LT 3-12 é em torno do trecho 10 km. Já a Figura 36 (b) indica que a faltas ocorrem em torno de 18 km da linha.

Figura 35: Causa e localização das falhas na linha de transmissão 3-12.

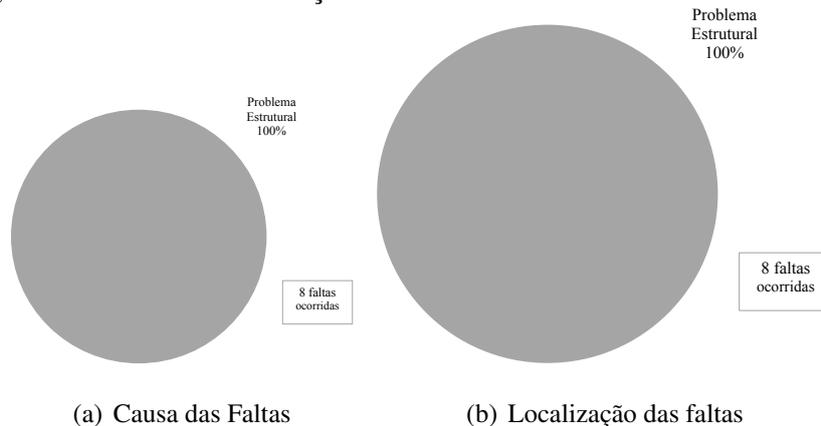


Fonte: O autor, 2018.

A Figura 37 apresenta as causas das falhas na barra 11. As 8 faltas ocorridas na barra foram relacionadas à atuação incorreta da proteção (67%) e à saturação de transformador de corrente (33%).

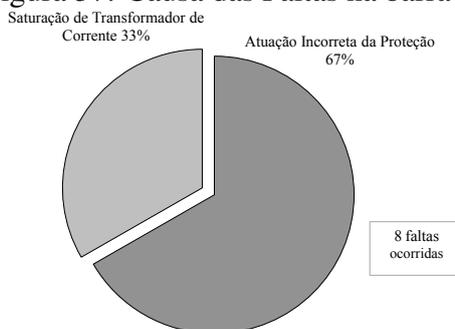
A Figura 38 apresenta as causas das falhas na barra 17. As 8 faltas ocorridas na barra foram relacionadas às condições normais de operação do reator (63%), à falha na proteção do reator (25%) e a desligamento da barra (13%).

Figura 36: Causa e localização das faltas na linha de transmissão 12-11.



Fonte: O autor, 2018.

Figura 37: Causa das Faltas na barra 11



Fonte: O autor, 2018.

Apurados os principais pontos de causa de afundamentos severos e de classes impactantes aos consumidores, recomenda-se as seguintes medidas para a concessionária de energia nos equipamentos:

- a) Instalação de Dispositivo anti-pouso de pássaros: Conforme analisado, a maior porcentagem de falhas teve a causa indeterminada. De acordo com a concessionária, parte destas faltas pode estar relacionadas a presença de pássaros nas linhas de transmissão. Quando os dejetos de pássaros são eliminados nas regiões entre os cabos condutores e a estrutura da torre, geram áreas de baixa resistência elétrica, provocando curtos-circuitos entre a linha e a estrutura da torre, com consequentes desligamentos monofásicos à terra. As linhas 17-16, 17-15, 16-12 e 17-18 apresentaram, respectivamente, 36%, 21%, 75% e 63% das causas das faltas como indeterminadas. De fato, foram identificadas nas linhas 17-16 e 17-15 falhas relacionadas a contatos de animais, tais

Figura 38: Causa das Faltas na barra 17



Fonte: O autor, 2018.

como pássaros. Desta forma, é recomendada a instalação de dispositivo anti-pouso de pássaros nas linhas 17-16, 17-15, 16-12 e 17-18. A instalação desses componentes diminui em média 87% na quantidade de desligamentos de uma linha de transmissão (CGTI, 2016). Soluções distintas para diferentes configurações de estruturas de transmissão: Para as torres que apresentam cadeias de isoladores em suspensão é indicado um equipamento que impede o pouso de aves diretamente sobre a cadeia, impedindo que seus dejetos venham a causar uma área de baixa impedância entre as fases superiores e a estrutura da torre, sem impedir o seu pouso em outros pontos a torre onde sua presença não apresenta potencial para gerar desligamentos. Já para as torres que apresentam cadeias de isoladores em ancoragem, onde o dispositivo anterior não surte efeito, é indicado um equipamento eletrônico que detecta a presença e afugenta as aves através de sinais luminosos e sonoros (CGTI, 2016). Assim, além de se recomendar a instalação de tais dispositivos nas linhas, recomenda-se a correção e maior efetividade da concessionária na identificação de faltas por pássaros, diminuindo o número de causas indeterminadas.

- b) Substituição dos Isoladores: Parte da indeterminação da causa das faltas também foi relacionada pela concessionária como em função da umidade da região em algumas algumas linhas. De fato, nas linhas 17-16, 17-15 e 17-18, respectivamente, 9%, 2% e 7% das causas foram identificadas como umidade. A umidade é frequentemente associada às falhas em isoladores compostos por fibras de vidro. Tal característica construtiva possibilita a penetração de umidade na terminação inferior e consequente contato com o núcleo do bastão PRV (polímero reforçado com vidro) levando à ruptura em serviço (LISBOA; FURTADO; OLIVEIRA, 2011). Dessa maneira, para proteção

dos isoladores da umidade, recomenda-se a substituição de isoladores de vidro por isoladores poliméricos ou por isoladores de vidro com cobertura polimérica de borracha de silicone-RTV (*Room Temperature Vulcanizing Silicone Rubber*) nas linhas de transmissão que apresentaram causas indeterminadas e relacionadas à umidade: 17-16, 17-15, 16-12 e 17-18.

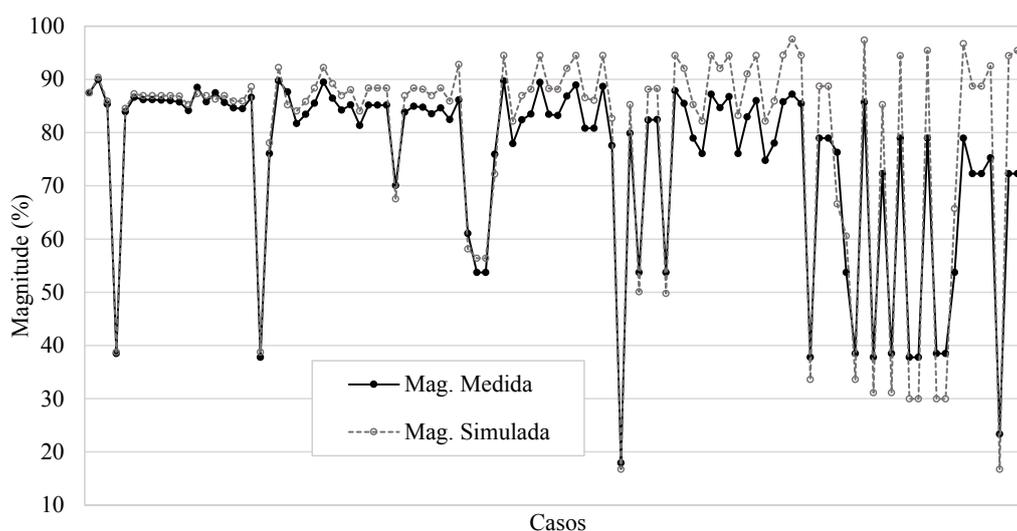
- c) Adequação do sistema de proteção das linhas de transmissão: Parte das faltas foi relacionada a falhas no sistema de proteção nas linhas 17-16, 17-15 e 17-18. É recomendado que sejam desenvolvidas filosofias de proteção que diminuam o impacto de falhas em outros equipamentos nas linhas 17-16, 17-15, 17-18 e 3-11. Adicionalmente, é indicado analisar a confiabilidade do SEP, realizando estudos de viabilidade para a instalação de equipamentos de proteção de retaguarda que repliquem a funcionalidade de outro, tal como o transformador de corrente na barra 11, que apresentou 33% dos casos de faltas na barra.
- d) Supressão na vegetação: Verificar a possibilidade de supressão da vegetação nas linhas 17-16 (todo trecho) e 16-12 (proximidades do trecho de 20 km e de 80km até o final da linha).
- e) Instalação de Sinalização e Conscientização das empresas de aviação: Muitas das linhas envolvidas estão em região de atividade agrícola. Inclusive na LT 17-15 foram registrados 3% de ocorrências com causa de queda de aeronave aeroagrícola. Assim, a fim de se evitar reincidência de eventos como este, recomenda-se à concessionária de energia a instalação de sinalizadores esféricos alaranjados nas linhas. Ainda, a realização de campanhas de conscientização da área das linhas envolvendo o Sindicato Nacional das Empresas de Aviação (SNEA) e os operadores aeroagrícolas também é recomendada.
- f) Verificação estrutural: Uma vez que as linhas 3-12 e 12-11 apresentaram como única causa problemas estruturais, é recomendada a verificação da estrutura nas proximidades do trecho de 10 km na LT 3-12 e do trecho de 20 km na LT 12-11.
- g) Treinamento das equipes de manutenção: Treinamento das equipes de manutenção de maneira a diminuir o número de desligamento forçados por falhas humanas. Em

especial a equipe responsável pela LT 17-18, uma vez que 4% das falhas foram relacionadas a acidentes em testes.

#### 4.4 Validação de um modelo de simulação

A partir do levantamento dos eventos simultâneos, foi possível simular as faltas elétricas que originaram afundamentos de tensão na barra do consumidor sensível. Foram simulados 105 casos que são referentes aos eventos registrados na barra 12 (230 kV). A Figura 39 apresenta a comparação da magnitude simulada no programa ANAFAS com o magnitude monitorada. Já a Figura 40 apresenta o erro relativo da magnitude simulada para cada caso.

Figura 39: Comparação da magnitude simulada com a magnitude monitorada

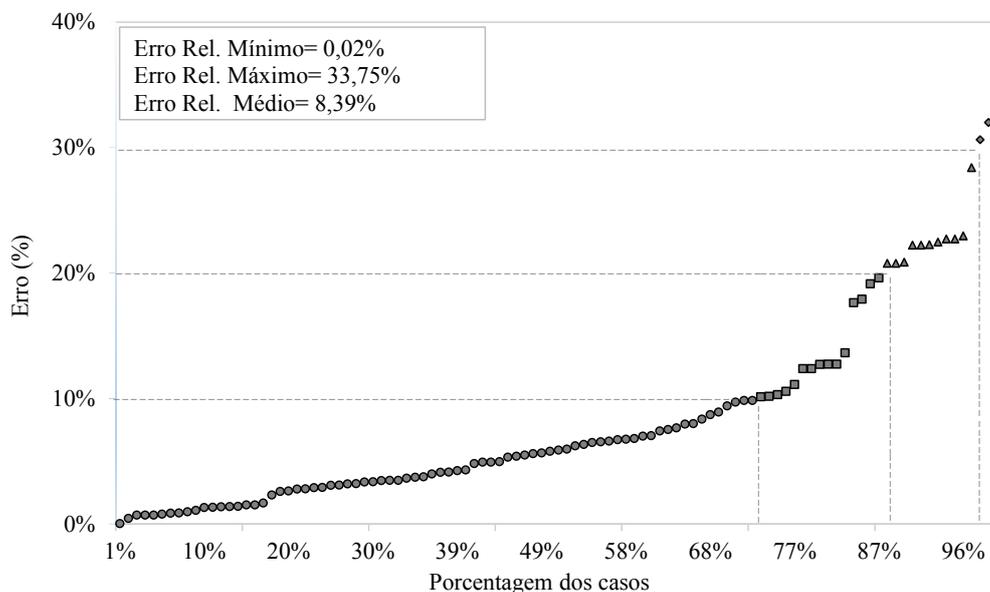


Fonte: O autor, 2018.

Pela Figura 40 é notado que em 72,38% dos casos o erro relativo foi menor ou igual a 10%. Assim como, que 13,33% das simulações apresentaram erro maior que 10% e menor ou igual a 20%; também que 8,57% apresentaram erro entre 20% e 30%; e que apenas 1,90% apresentaram erro maior do que 30%.

A fim de investigar as causas de faltas com maiores erros nas simulações, foi plotada a Figura 41. Em tal figura é apresentado o erro para faltas causadas por Árvores, Vegetação e Objetos (AVO) na Figura 41(a); por Causas Naturais (CN) tais como descargas atmosféricas, vento forte e chuva na Figura 41(b); por Causas Indeterminadas (DI) na

Figura 40: Erros relativos da magnitude simulada



Fonte: O autor, 2018.

Figura 41(c); e por falhas nos equipamentos elétricos do SEP (FE) na Figura 41(d).

Analisando as Figuras 41(a-d), é notado que os erros relacionados à FE são distribuídos de 0 a 35%. Por outro lado, as faltas causadas por AVO, CN e DI apresentaram maior concentração dos erros em torno de 10%. Assim, o maior erro médio foi de 15,64% para faltas relacionadas à falhas nos equipamentos elétricos. E os menores erros médios foram entre 5% e 6% para os casos de AVO, CN e DI.

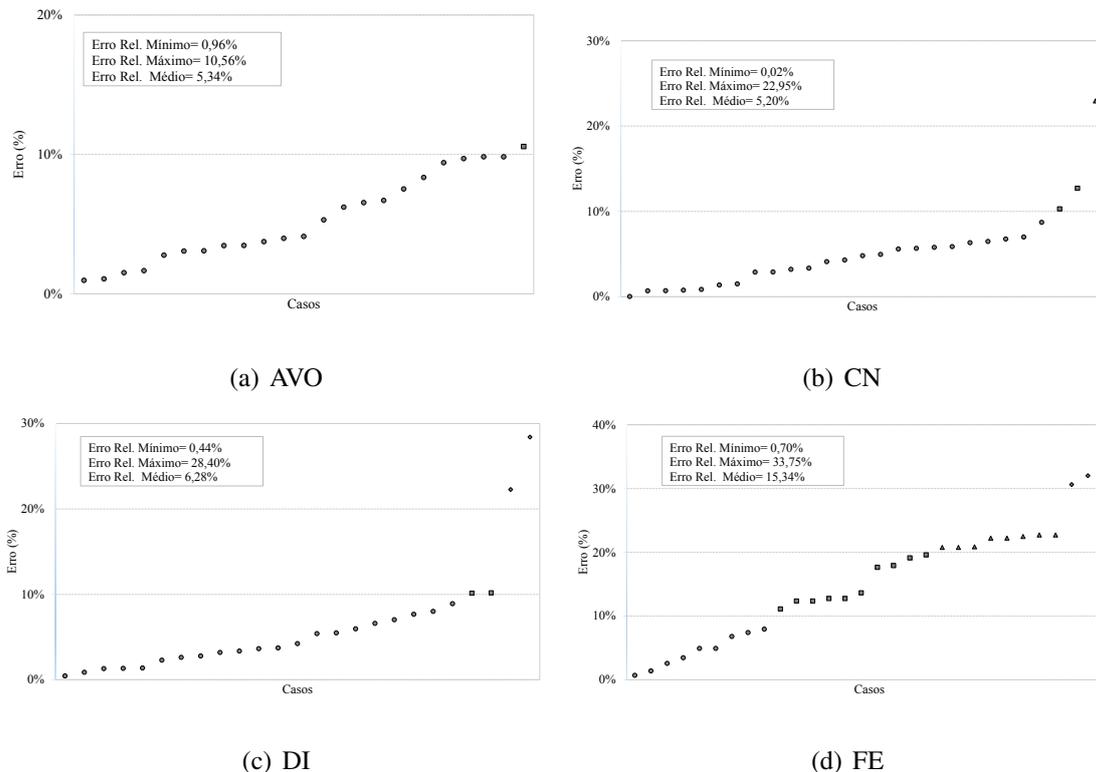
Por fim, a partir das simulações foi possível estabelecer os valores típicos de resistência para o SEP analisado. A Tabela 17 apresenta os valores indicados para simulação deste sistema de acordo com a causa da falta.

Tabela 17: Resistência de falta

$R_f (\Omega)$	AVO	CN	DI	FE
0-5	82,61%	33,33%	64%	63,33%
5-10	17,39%	62,96%	32%	36,67%
10-20	0%	0%	4%	0%
20-40	0%	0,37%	0%	0%

Fonte: O autor, 2018.

Figura 41: Erros relativos da simulação para cada tipo de causa



Fonte: O autor, 2018.

## 4.5 Análise Geral

Pela quantificação dos afundamentos pelas padronizações IEEE 1564 e Módulo 8 do PRODIST foi possível mensurar o número de afundamentos para cada nível de monitoração para todo período de análise e para intervalos mensais. Pela simples quantificação de eventos, foi notada uma diferença no número de ocorrência computado por cada padronização. Tal divergência foi oriunda da definição de afundamento de tensão entre as padronizações, já que a IEEE 1564 considera eventos com duração de até um minuto e o módulo 8 do PRODIST de até três minutos. Como também, o intervalo de tempo para agregação é diferente entre os procedimentos, já que o do IEEE é realizado durante um minuto e o da ANEEL em três minutos. Mesmo com uma computação divergente, em ambas quantificações o nível com maior número de afundamentos foi o de 230 kV. Pela aplicação do indicador de fator de impacto, foi notado que nos três níveis de tensão todos os meses de monitoração apresentaram  $FI < 1$ . Por outro lado, o indicador de severidade indicou meses com  $S \geq 1$  (mês 10 em 13,8 kV, mês 20 em 34,5 kV e mês 24 em 230 kV). Tal diferença foi atribuída ao  $FI_{base}$  do PRODIST.

De maneira à contribuir no aprimoramento dos métodos de caracterização dos afundamentos de tensão, o presente estudo aponta algumas sugestões, destacando-se:

- em relação à *duração do evento*, conforme destacado na análise dos eventos com duração maior que um minuto, bem como da sugestão da ABRACE em estabelecer um limite baseado no tempo de religamentos automáticos, recomenda-se uma redefinição de afundamento de tensão por parte da ANEEL. Uma possível solução seria utilizar a mesma definição de afundamentos da IEEE;
- em relação ao *período de medição*, como os afundamentos de tensão são eventos sazonais, um período de 30 dias é um muito curto e não representa adequadamente 12 meses de um ano. Ao estender para 1 ano de medições, conforme definido pelo IEEE, é possível considerar a sazonalidade dos eventos e retratar melhor o impacto do fenômeno;
- em relação ao *impactos regionais*, a consideração de um fator de ponderação regional que considere aspectos locais como o perfil de carga e a sazonalidade, permitiria a diferenciação do  $FI_{base}$  para diferentes regiões. Dessa maneira, tornaria-se possível incorporar restrições de acordo com as características regionais, climáticas, sazonais, rurais e urbanas;
- em relação ao *fator de ponderação dos níveis de sensibilidade*, as ponderações são correlacionadas com os valores disponibilizados na sul-africana, o que não condiz com a realidade de todo o sistema de distribuição brasileiro. Assim como, não fica evidente tanto na NRS 048-2 como estes valores foram determinados. Para realizar tais melhorias, na última consulta pública foi destacada a necessidade de medições em diferentes pontos do sistema elétrico brasileiro, de maneira a avaliar a sazonalidade do fenômeno e as particularidades das regiões e das indústrias.
- por fim, em relação às *penalidades*, em nenhuma das padronizações é citada se devem ser estabelecidas penalidades na ultrapassagem dos limites. Na consulta pública da ANEEL, muitas contribuições destacaram a necessidade do desenvolvimento de estudos em todo o sistema elétrico brasileiro antes de estabelecer uma penalização. Seria imparcial penalizar igualmente as concessionárias, pois em alguns estados a probabilidade de eventos é muito maior que em outros.

Na análise do efeito das faltas elétricas nos afundamentos de tensão, foi observado que os eventos com menor magnitude (M1) são aqueles que estão próximos do consumidor (classe de distância TO e T1) e que não têm conexão direta com geração (NG). Por outro lado, foi notado que as relações para a duração crítica (D3) são aqueles eventos que ocorrem nas classes de distância T1 e T2 que estão conectados diretamente à geração. Pela aplicação do indicador de severidade foi possível englobar os casos críticos de magnitude e duração. Já pela utilização das classes de sensibilidade do PRODIST as condições foram as mesmas da magnitude. As diferenças entre os indicadores foram notadas visualmente nas áreas de vulnerabilidade, notando-se a maior incorporação das características dos afundamentos na área de acordo com a severidade. Devido ao indicador do IEEE ter agregado mais informações do efeito dos afundamentos de tensão, as recomendações de mitigação para reduzir o número de faltas foram baseadas na região que originou afundamentos com  $S \geq 1$ .

Finalmente, foi possível validar um modelo de simulação do SEP analisado no programa ANAFAS, garantindo erro relativo menor ou igual a 10% em 72,38% dos casos.

## 5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

### 5.1 Conclusões

Diversos aspectos norteiam a caracterização de afundamentos de tensão. Em âmbito nacional, os afundamentos são avaliados por um fator de impacto e a sua estratificação é efetuada com valores tabelados de amplitude e duração, classificando-os por regiões. Por outro lado, a padronização internacional do IEEE classifica os eventos como severos ou não-severos com o auxílio de curvas de sensibilidade, que relacionam tensão e tempo. De maneira geral, os resultados obtidos nos estudos de caso apontaram que, pela aplicação dos indicadores, foi notada uma diferença na avaliação por cada padronização. Pelo  $FI$  da ANEEL, todos os meses de monitoração apresentaram  $FI < 1$ . Por outro lado, o indicador de severidade indicou meses com  $S \geq 1$  (mês 10 em 13,8 kV, mês 20 em 34,5 kV e mês 24 em 230 kV). A diferença foi atribuída ao  $FI_{base}$  do PRODIST.

Neste trabalho também foi estabelecido o agrupamento entre variáveis de faltas elétricas e afundamentos de tensão, visando relacionar as características de falhas de um sistema de potência com as dos afundamentos de tensão em um consumidor sensível. A partir da visualização dos dados justificou-se o uso de um algoritmo de agrupamento, uma vez que vários parâmetros afetaram os indicadores dos afundamentos de tensão. Os resultados dos agrupamentos apontaram que com a utilização do indicador de severidade foi possível incorporar os casos críticos de magnitude e duração dos afundamentos. De maneira diferente, pela utilização das classes de sensibilidade do PRODIST, as condições críticas estabelecidas foram as mesmas da magnitude. As diferenças dos indicadores foram notadas visualmente nas áreas de vulnerabilidade, notando-se a maior incorporação das características dos afundamentos na área de acordo com a severidade.

Além disso, foram recomendadas soluções de mitigação para reduzir o número de faltas no SEP, e por conseguinte, diminuir o efeito dos afundamentos de tensão no consumidor industrial. Uma vez que o indicador de severidade agregou mais informações a respeito do efeito dos afundamentos de tensão, as recomendações foram baseadas na região que originou eventos com  $S \geq 1$ . Pelo levantamentos das causas das faltas nas linhas de transmissão e barras do SEP da região severa, foram estabelecidas diversas medidas, tais como: instalação de dispositivo anti-pouso de pássaros, substituição de isoladores, adequação das proteção das linhas, supressão da vegetação, conscientização das empresas de aviação agrícola, verificação estrutural e treinamento das equipamentos de manutenção. Embora tais medidas possam ser já de conhecimento da concessionária de energia, uma vez que estas falhas também danificam os equipamentos da rede, essas melhorias seriam realizadas de acordo com os interesses do consumidor industrial.

Adicionalmente, um modelo de simulação no programa ANAFAS foi validado, garantindo para mais de 70% dos casos um erro relativo menor ou igual a 10%. Foi notado que os erros médios foram maiores para o caso de falhas nos equipamentos elétricos do SEP e que para as demais causas das faltas (contato de animais/vegetação/objetos, causas naturais e indeterminadas) o erro médio foi menor do que 6%. Bem como, com as simulações realizadas foram determinadas faixas de resistência de falta para cada tipo de causa faltosa. Tais valores, juntamente com as taxas de faltas do SEP, podem ser úteis na predição de afundamentos de tensão para outros consumidores do sistema em estudo.

Por fim, por mais que tal trabalho tenha sido aplicado a um estudo de caso específico, tal metodologia pode ser aplicada em outros sistemas elétricos e consumidores sensíveis. Assim, as proposições levantadas podem ser aplicadas para em futuras monitorações, investigações de causas e soluções de mitigação. Igualmente, as relações obtidas podem ser utilizadas em estudos preditivos para outros consumidores conectados no SEP em estudo.

## 5.2 Sugestões para Trabalhos Futuros

Mesmo que o trabalho desenvolvido nesta dissertação apresente contribuições para o tema de afundamentos de tensão e a relação com faltas elétricas, o estudo pode ser continuado e melhorado a partir das seguintes sugestões:

- Avaliar economicamente o efeito dos afundamentos de tensão no consumidor in-

dustrial e a viabilidade das soluções de mitigação estabelecidas neste trabalho.

- Realizar a predição da quantificação afundamentos de tensão no consumidor industrial a partir da utilização dos indicadores de severidade e fator de impacto. Com isso, executar um estudo comparativo da predição com os valores reais obtidos nesta dissertação;
- Executar monitorações paralelas em consumidores sensíveis de um mesmo SEP. Com isso, analisar o efeito de propagação dos afundamentos nas indústrias e verificar a diferença das características das faltas que causa afundamentos severos e impactantes aos consumidores. Ainda, a averiguação de propostas de mitigação para cada indústria, estabelecendo um plano de planejamento para a transmissora de energia.

## REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Consulta Pública n.05**. Brasília, 2011.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Consulta Pública n.018**. Brasília, 2014.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Procedimentos de Distribuição de Energia no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST Módulo 8**. Brasília, 2018.
- ARIAS-GUZMÁN, S. et al. Analysis of voltage sag severity case study in an industrial circuit. **IEEE Transactions on Industry Applications**, New York, v.53, n.1, p.15–21, 2017.
- BAGGINI, A. **Handbook of power quality**. New Jersey: John Wiley & Sons, 2008.
- BAGHERI, A.; BOLLEN, M. Developments in voltage dip research and its applications, 2005-2015. In: HARMONICS AND QUALITY OF POWER INTERNATIONAL CONFERENCE, 17., 2016, Belo Horizonte. **Proceedings**. . . New York: IEEE, 2016. p.1–46.
- BOLLEN, M. H. **Understanding power quality problems: voltage sags and interruptions**. New York: IEEE, 2000.
- BOLLEN, M. H.; GU, I. Y. **Signal processing of power quality disturbances**. New Jersey: John Wiley & Sons, 2006.
- CARNEIRO, J. R. V. **Uma contribuição para Determinação de Valores de Referência para as Variações de Tensão de Curta Duração**. 2015. 165 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) —Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2015.
- CARPINELLI, G. et al. Methods for assessing the robustness of electrical power systems against voltage dips. **IEEE Transactions on Power Delivery**, New York, v.24, n.1, p.43–51, 2009.
- CENTRO DE GESTÃO E INOVAÇÃO. **Desenvolvimento de Dispositivo Repelente Automático de Pássaros para Linhas de Transmissão**. Campinas: CGTI, 2016. Disponível em: < <http://www.cgti.org.br/publicacoes/wp-content/uploads/2016/04/Desenvolvimento-de-Dispositivo-Repelente-Automa%CC%81tico-de-Pa%CC%81ssaros-para-Linhas-de-Transmissa%CC%83o.pdf>>. Acesso em: 09 mar. 2018.
- CHOWDHURY, B. H. **Power quality**. New York: IEEE Potentials, 2001.
- DE SANTIS, M. et al. Analysis of the origin of measured voltage sags in interconnected networks. **Electric Power Systems Research**, Amsterdam, v.154, p.391–400, 2018.

DUGAN, R. C.; MCGRANAGHAN, M. F.; BEATY, H. W. **Electrical power systems quality**. New York: McGraw-Hill, 2004.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Anuário estatístico de energia elétrica**. Rio de Janeiro: 2017. Disponível em: < <http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-160/topico-168/Anuario2017vf.pdf>>. Acesso em: 07 março de 2018.

ESSL, N.; RENNER, H. Assessing the severity of voltage sags due to short circuits intransmission and distribution grids. In: HARMONICS AND QUALITY OF POWER INTERNATIONAL CONFERENCE, 14., 2016, Belo Horizonte. **Proceedings**. . . New York: IEEE, 2016. p.1–46.

GOMEZ, J. C. et al. Behavior of induction motor due to voltage sags and short interruptions. **IEEE Transactions on Power Delivery**, New York, v.17, n.2, p.434–440, 2002.

GOSWAMI, A.; GUPTA, C.; SINGH, G. Area of vulnerability for prediction of voltage sags by an analytical method in indian distribution systems. In: INDIA CONFERENCE INDICON, 2., 2008, Kampur. **Proceedings**. . . New York: IEEE , 2008. p.406–411.

GRIGSBY, L. L. **Electric power generation, transmission, and distribution**. Boca Raton: CRC, 2016.

INFORMATION TECHNOLOGY INDUSTRY COUNCIL. **Standard curve for computer business equipment**. Brussels, 2000.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **Standard 446**: IEEE recommended practice for emergency and standby power systems for industrial and commercial applications. New York, 1995.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **Standard 1346**: IEEE recommended practice for evaluating electric power system compatibility with electronic process equipment. New York, 1998.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **Standard 1100**: IEEE recommended practice for powering and grounding sensitive electronic equipment. New York, 1999.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **Standard 493**: IEEE recommended practice for the design of reliable industrial and commercial power systems. New York, 2007.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **Standard 1564**: IEEE recommended practice for the design of reliable industrial and commercial power systems. New York, 2014.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **Standard 1564**: IEEE guide for voltage sag indices. New York, 2014.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **1564 Task Force**. New York, 2014.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION . **NRS 048-2**: electricity supply - quality of supply part 2: minimum standards for application by the national electricity regulator. Genebra, 1996.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION . **IEC 61000-2-11**: electromagnetic compatibility (emc) - part 2-11: environment - classification of hemp environments. Genebra, 1999.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION . **IEC 61000-4-11**: electromagnetic compatibility: testing and measurement techniques - voltage dips, short interruptions and voltage variations immunity tests. Genebra, 2005.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC 61000-4-34**: electromagnetic compatibility: voltage dips, short interruptions and voltage variations immunity tests for equipment with input current more than 16 A per phase. Genebra, 2005.

KEMPNER, T. R. **Análise da robustez e da sensibilidade de sistemas de distribuição para a alocação otimizada de medidores frente às variações de tensão de curta duração**. 2017. 217 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) — Programa de Engenharia Elétrica, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017.

KEY, T. S. Diagnosing power quality-related computer problems. **IEEE Transactions on Industry Applications**, New York, n.4, p.381–393, 1979.

LEBORGNE, R. C. **Uma contribuição à caracterização da sensibilidade de processos industriais frente a afundamentos de tensão**. 2003. 163 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2003.

LINDEN, R. Tutorial de Técnicas de Agrupamento. **Revista de Sistemas de Informação da FSMA**, Macaé, v.1, n.4, p.18–36, 2009.

LISBOA, M.; FURTADO, H.; OLIVEIRA, W. Análise de falha em isolador polimérico. **Revista Matéria**, Rio de Janeiro, v.16, n.4, p.811–818, 2011.

MACQUEEN, J. et al. Some methods for classification and analysis of multivariate observations. In: BERKELEY SYMPOSIUM ON MATHEMATICAL STATISTICS AND PROBABILITY, 3., 1967, Berkeley. **Proceedings**. . . Berkeley: University of California Press, 1967. p.281–297.

MIRANDA FILHO, J. et al. A PCA-based approach for substation clustering for voltage sag studies in the Brazilian new energy context. **Electric Power Systems Research**, Amsterdam, v.136, p.31–42, 2016.

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. **Applied statistics and probability for engineers**. New Jersey: John Wiley & Sons, 2010.

OLIVEIRA MONTEIRO, E. de; FERREIRA FILHO, A. D. L. Comparative analysis of regulatory procedures for classifying short-duration voltage variations. In: HARMONICS AND QUALITY OF POWER INTERNATIONAL CONFERENCE, 17., 2016, Belo Horizonte. **Proceedings**. . . New York: IEEE, 2016. p.569–574.

OLIVEIRA, T. C. de et al. Analysis of the relation between voltage sags severity and fault characteristics. In: HARMONICS AND QUALITY OF POWER INTERNATIONAL CONFERENCE, 14., 2010, Bergamo. **Proceedings**. . . New York: IEEE, 2010. p.1–8.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. **Sistema de informações geográficas cadastrais do sistema elétrico interligado**. Disponível em: <<http://sindat.ons.org.br/ONS.SiteONS.Sindat/redirect.ashx>>. Acesso em: 08 mar. 2018.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. **Submódulo 2.8**: gerenciamento dos indicadores de qualidade de energia. Brasília, 2016.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. **Submódulo 3.6**: requisitos mínimos técnicos para a conexão às instalações de transmissão. Brasília, 2016.

PARK, C.-H.; JANG, G. Systematic method to identify an area of vulnerability to voltage sags. **IEEE Transactions on Power Delivery**, New York, v.32, n.3, p.1583–1591, 2017.

POWER STANDARDS LAB. **Specification for semiconductor processing equipment voltage sag immunity**. Alameda, 2006.

RAMOS, A. **Relatório parcial**: protocolo de medição e monitoração da qualidade de energia. Recife: ANEEL, 2000.

SABIN, D. D.; BOLLEN, M. H. Overview of IEEE Std 1564-2014 guide for voltage sag indices. In: HARMONICS AND QUALITY OF POWER INTERNATIONAL CONFERENCE, 16., 2014, Bucharest. **Proceedings**. . . New York: IEEE, 2014. p.497–501.

SCHNEIDER ELECTRIC. **Medidor de energia e qualidade de energia PowerLogic ION8650**. Disponível em: <<https://www.se.com/br/pt/product-range/61053-ion8650/>>. Acesso em: 09 mar. 2018.

SINGH, B.; CHANDRA, A.; AL-HADDAD, K. **Power quality**: problems and mitigation techniques. New Jersey: John Wiley & Sons, 2014.

TAN, O.N.; STEINBACH, M. K. V. **Introduction to Data Mining**. Londres: Pearson Education Inc., 2006.

WATANABE, G. T. **Uma contribuição a análise de perdas ocasionadas por afundamentos momentâneos de tensão**. 2010. 149 p. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2010.

## APÊNDICE A REGISTROS DA MONITORAÇÃO DOS AFUNDAMENTOS DE TENSÃO

A-Tabela 1: Eventos registrados pelo monitoramento nos três níveis de tensão.

<b>Data/Hora</b>	<b>Duração (s)</b>	<b>Magnitude (% Nominal)</b>	<b>Medição (kV)</b>
2015-mai-02 22:09:32,803	0,039999999	88,62024689	230
2015-mai-02 22:19:01,573	0,032000002	88,34102631	230
2015-mai-02 22:19:05,757	0,032000002	88,2798996	230
2015-mai-02 22:21:18,926	0,033	89,32429504	230
2015-mai-02 22:21:20,044	0,048	89,26291656	230
2015-mai-02 22:30:21,628	0,041000001	89,06884003	230
2015-mai-02 22:42:27,605	0,041000001	89,34115601	230
2015-mai-02 22:42:31,630	0,032000002	89,48835754	230
2015-mai-02 22:51:29,453	0,024	89,6698761	230
2015-mai-03 03:14:49,243	0,092	83,30895996	230
2015-mai-03 04:00:55,526	0,116999999	79,54509735	230
2015-mai-03 14:59:44,981	0,026000001	87,19108582	230
2015-mai-03 15:05:05,164	0,033	85,52571869	230
2015-mai-07 17:58:21,772	3614173	0	13,8
2015-mai-07 17:54:15,903	3703686	0	34,5
2015-jun-21 17:31:29,790	0,074000001	63,69705963	230
2015-jul-13 11:13:29,961	0,016000001	89,64082336	230
2015-jul-14 07:32:20,098	0,039999999	87,98810577	230
2015-jun-21 17:31:29,788	0,066	83,13174438	13,8
2015-jul-12 19:14:19,206	0,064999998	89,91074371	13,8
2015-jul-15 12:43:39,527	874,4539795	0	13,8
2015-jun-19 14:42:22,655	1,51699996	125,3900681	34,5
2015-jun-19 14:45:45,794	106,8030014	1,091944575	34,5

<b>Data/Hora</b>	<b>Duração (s)</b>	<b>Magnitude (% Nominal)</b>	<b>Medição (kV)</b>
2015-jun-19 14:48:13,397	123,2610016	1,147484422	34,5
2015-jun-19 14:51:00,018	73,10700226	1,17348063	34,5
2015-jun-19 14:52:27,163	139,4570007	1,160715342	34,5
2015-jun-19 14:55:08,112	44,08300018	1,372430682	34,5
2015-jun-19 14:56:06,304	67,58499908	1,183173656	34,5
2015-jun-19 14:57:44,948	60,8219986	1,198590517	34,5
2015-jun-19 14:59:19,332	403,6220093	1,157049894	34,5
2015-jun-19 15:06:26,097	64,49099731	1,180143356	34,5
2015-jun-19 15:08:02,031	97,23500061	1,158759236	34,5
2015-jun-19 15:09:51,903	76,8219986	1,16538763	34,5
2015-jun-19 15:24:53,018	6581,625	0	34,5
2015-jun-21 17:31:29,798	0,066	86,47317505	34,5
2015-jul-12 15:41:11,747	3687,398926	0	34,5
2015-jul-12 17:12:04,645	20976,97266	0	34,5
2015-jul-13 06:12:57,891	33671,21875	0	34,5
2015-ago-15 10:31:18,045	0,063000001	70,06874084	230
2015-ago-17 22:06:02,594	0,033	83,25357819	230
2015-jul-21 08:37:07,886	0,032000002	84,81900024	13,8
2015-ago-07 20:22:04,812	0,039000001	52,30765152	13,8
2015-jul-23 09:46:21,083	27375,50391	0	34,5
2015-jul-25 09:38:22,129	10400,74805	0	34,5
2015-jul-30 17:35:43,667	3067,615967	0	34,5
2015-ago-03 12:18:53,908	0,300999999	118,0156631	34,5
2015-ago-03 12:18:54,790	75043,26563	0	34,5
2015-ago-04 09:13:31,577	48,79800034	1,121577978	34,5
2015-ago-07 12:47:11,780	0,375999987	121,0681381	34,5
2015-ago-07 12:47:12,740	11009,39648	0	34,5
2015-ago-22 23:10:16,890	0,072999999	76,05412292	230
2015-ago-24 13:11:11,228	0,050000001	85,53276825	230
2015-set-04 09:58:31,215	0,057999998	81,71813965	230
2015-set-16 13:29:28,877	0,008	89,75324249	230
2015-set-18 15:51:59,483	0,041000001	85,67162323	230
2015-set-18 15:52:00,708	0,041000001	87,69322205	230
2015-set-19 10:23:20,666	0,050000001	83,55289459	230
2015-set-21 06:17:04,721	0,075999998	83,40853882	230
2015-ago-23 09:37:47,823	0,059	48,94944	13,8
2015-set-19 01:23:56,642	0,025	62,39807892	13,8

<b>Data/Hora</b>	<b>Duração (s)</b>	<b>Magnitude (% Nominal)</b>	<b>Medição (kV)</b>
2015-ago-24 17:55:19,024	9035,123047	0	34,5
2015-set-08 12:14:53,717	6616,470215	0	34,5
2015-set-15 18:01:48,194	116950	0	34,5
2015-set-21 00:53:43,790	0,181999996	114,674408	34,5
2015-set-21 00:53:44,504	7449,862793	0	34,5
2015-set-22 17:52:52,964	29200,76758	0	230
2015-set-24 19:14:01,276	0,039999999	86,18610382	230
2015-set-24 19:14:05,400	0,041999999	86,9571228	230
2015-set-24 19:19:04,234	0,041000001	88,57314301	230
2015-out-02 11:50:49,984	0,082000002	75,93344116	230
2015-out-02 12:48:19,103	0,057999998	71,05831146	230
2015-out-08 06:22:33,100	0,032000002	83,74455261	230
2015-out-08 22:17:51,007	0,048999999	78,11314392	230
2015-out-14 22:28:07,116	0,057999998	68,55123901	230
2015-out-14 22:28:08,259	0,090999998	69,2387085	230
2015-out-14 22:29:58,669	0,057999998	70,33808899	230
2015-out-14 22:38:51,404	0,066	53,72641754	230
2015-out-14 22:38:51,655	0,064999998	38,50177383	230
2015-out-14 22:38:52,179	0,123999998	37,79786682	230
2015-out-14 22:51:30,037	0,046	86,63696289	230
2015-out-14 22:51:30,283	0,057999998	88,50795746	230
2015-out-14 23:09:25,613	0,057999998	86,93855286	230
2015-out-15 00:07:48,488	0,083999999	25,38912964	230
2015-out-15 07:13:20,524	0,039999999	81,70837402	230
2015-out-15 17:31:06,522	0,050000001	89,56880951	230
2015-out-17 01:35:24,816	0,082999997	85,71681213	230
2015-out-18 06:25:27,893	0,093000002	82,4567337	230
2015-out-15 00:07:48,488	0,067000002	86,50283813	13,8
2015-out-18 09:00:42,811	0,034000002	64,15458679	13,8
2015-out-21 15:33:54,408	0,033	60,13867188	13,8
2015-out-14 22:38:51,664	0,057	87,70560455	34,5
2015-out-14 22:38:52,206	0,090000004	81,75500488	34,5
2015-out-15 00:07:48,495	0,075000003	66,84899139	34,5
2015-nov-13 11:46:04,069	0,039000001	84,9229126	230
2015-nov-13 11:46:13,535	0,041000001	84,64736176	230
2015-nov-18 04:38:52,663	0,032000002	89,46765137	230
2015-nov-18 08:06:12,582	0,025	89,74298859	230

<b>Data/Hora</b>	<b>Duração (s)</b>	<b>Magnitude (% Nominal)</b>	<b>Medição (kV)</b>
2015-nov-21 23:36:42,650	0,082999997	83,81233978	230
2015-nov-24 00:52:36,311	0,072999999	53,72928619	230
2015-nov-04 09:24:01,197	7544,684082	0	13,8
2015-nov-12 15:18:16,751	1,25	81,72306824	13,8
2015-nov-12 20:37:23,841	0,400999993	87,08802032	13,8
2015-nov-16 17:51:58,398	0,435000002	79,06790924	13,8
2015-nov-16 18:08:44,861	0,041000001	86,80976868	13,8
2015-nov-16 18:24:04,233	0,008	110,7176285	13,8
2015-nov-17 10:01:52,594	134,7039948	86,90242004	13,8
2015-nov-17 10:12:21,911	0,508000016	86,35137939	13,8
2015-nov-18 04:44:24,186	977,7399902	0	13,8
2015-nov-18 05:43:46,100	0,090999998	71,2330246	13,8
2015-nov-24 00:52:36,318	0,039999999	89,14538574	13,8
2015-nov-25 18:06:24,954	0,259999999	87,21168518	13,8
2015-out-27 13:09:25,624	0,123000003	112,2358704	34,5
2015-out-27 13:09:26,289	19022,08789	0	34,5
2015-nov-08 23:18:47,631	701804	0	34,5
2015-nov-17 03:19:27,074	13320,35254	0	34,5
2015-nov-17 07:23:23,629	21623,62695	0	34,5
2015-nov-24 00:52:36,324	0,041000001	88,72628784	34,5
2015-nov-25 18:06:24,998	0,158999994	88,10044098	34,5
2015-nov-25 18:06:25,786	21285,94336	0	34,5
2015-dez-01 21:24:29,302	0,048999999	87,390625	230
2015-dez-09 14:52:25,664	0,064000003	54,45687485	230
2015-dez-13 00:47:38,737	0,050000001	85,48161316	230
2015-dez-18 10:15:58,219	0,107000001	85,70806122	230
2015-dez-18 14:17:14,987	0,059	76,51641846	230
2015-dez-18 14:25:11,527	0,066	83,93190765	230
2015-dez-22 12:31:09,179	0,067000002	73,10544586	230
2015-dez-23 18:25:56,458	0,340999991	88,67133331	230
2015-dez-30 00:37:01,598	0,022	89,96627045	230
2015-dez-09 14:52:25,659	0,056000002	84,09093475	13,8
2015-dez-30 11:49:58,042	0,216999993	88,63540649	13,8
2015-dez-30 11:49:58,993	0,231999993	89,60967255	13,8
2015-dez-09 14:52:25,675	0,057	80,40049744	34,5
2015-dez-24 18:23:35,226	0,092	5,543453217	34,5
2015-dez-24 18:56:08,179	0,115000002	7,045232296	34,5

<b>Data/Hora</b>	<b>Duração (s)</b>	<b>Magnitude (% Nominal)</b>	<b>Medição (kV)</b>
2015-dez-24 18:58:52,412	0,125	6,162002563	34,5
2015-dez-24 20:07:23,406	0,108000003	5,547661304	34,5
2015-dez-30 11:49:59,479	16154,86035	0	34,5
2015-dez-31 18:12:40,834	0,006	110,5707474	34,5
2015-dez-31 18:12:40,991	0,107000001	111,1986923	34,5
2015-dez-31 18:13:45,031	5568,996094	0	34,5
2016-jan-06 11:11:00,253	0,046999998	87,99790955	230
2016-jan-08 08:48:03,164	0,712000012	72,28903961	230
2016-jan-08 08:48:08,163	0,684000015	78,95238495	230
2016-jan-11 09:40:49,605	0,077	76,05945587	230
2016-jan-23 06:03:29,469	0,066	84,14723969	230
2016-jan-25 09:03:57,215	0,150000006	76,03910065	230
2016-jan-25 12:27:07,937	0,116999999	74,78670502	230
2016-jan-25 12:28:40,997	0,116999999	85,65766144	230
2016-jan-25 13:09:46,039	3388,248047	88,80618286	230
2016-jan-25 16:12:17,454	0,032000002	86,82063293	230
2016-jan-25 17:32:22,315	0,050000001	83,20088196	230
2016-jan-25 17:32:58,154	0,050000001	83,32169342	230
2016-jan-25 17:33:09,487	0,048999999	83,26919556	230
2016-jan-25 17:33:31,349	0,059	83,19283295	230
2016-jan-27 03:23:58,455	0,092	84,316185	230
2016-jan-29 21:44:40,056	0,057999998	86,22882843	230
2016-jan-29 22:02:47,458	0,068000004	84,90331268	230
2016-jan-29 22:02:57,776	0,074000001	88,73854065	230
2016-jan-29 22:15:10,381	0,066	89,17469788	230
2016-jan-08 08:48:03,341	0,518000007	86,1756134	13,8
2016-jan-08 10:36:23,405	1,027999997	86,16109467	13,8
2016-jan-08 10:40:26,911	1733,671997	0	13,8
2015-dez-31 22:26:56,217	0,208000004	113,013092	34,5
2015-dez-31 22:27:56,777	3931,433105	0	34,5
2016-jan-08 08:48:03,367	0,476000011	86,12197113	34,5
2016-jan-08 08:48:08,263	0,558000028	88,70095825	34,5
2016-jan-08 10:25:51,381	0,314000001	111,5132141	34,5
2016-jan-08 10:36:23,484	60315,57422	0	34,5
2016-jan-09 06:01:54,110	12299,14258	0	34,5
2016-fev-12 01:50:58,140	0,067000002	77,67479706	230
2016-fev-26 23:48:47,836	0,041999999	85,76828766	230

<b>Data/Hora</b>	<b>Duração (s)</b>	<b>Magnitude (% Nominal)</b>	<b>Medição (kV)</b>
2016-fev-26 23:48:49,019	0,067000002	85,5009613	230
2016-mar-03 04:44:18,404	0,057	71,34290314	230
2016-mar-07 12:21:33,376	0,092	65,76776886	230
2016-mar-10 20:32:05,814	0,008	89,74475098	230
2016-fev-16 17:01:55,980	0,681999981	6,03531599	13,8
2016-fev-16 17:33:04,676	0,666000009	3,132637024	13,8
2016-mar-07 12:21:33,363	0,367000014	39,41223145	13,8
2016-fev-24 16:21:48,591	17548,13867	0	34,5
2016-mar-03 04:44:18,408	0,048999999	84,6328125	34,5
2016-mar-07 12:21:33,370	0,123999998	4,951303005	34,5
2016-mar-07 12:21:33,635	7029,811035	0	34,5
2016-mar-07 14:20:40,421	5454,780762	0	34,5
2016-mar-21 19:36:08,106	0,033	87,94632721	230
2016-mar-21 20:03:19,501	0,041000001	85,21845245	230
2016-mar-30 05:17:34,354	0,082999997	86,18808746	230
2016-abr-02 21:42:24,392	0,041000001	86,11544037	230
2016-abr-07 06:09:00,669	0,041000001	85,78586578	230
2016-mar-19 10:40:10,902	0,101000004	33,15382767	13,8
2016-mar-19 12:29:37,379	9635,961914	0	13,8
2016-mar-26 11:20:34,718	0,098999999	29,82175636	13,8
2016-mar-27 18:15:10,248	0,090999998	30,42965698	13,8
2016-mar-28 00:48:14,635	0,064999998	62,18101501	13,8
2016-mar-30 05:00:52,304	0,098999999	29,00052452	13,8
2016-mar-30 08:58:26,892	0,319000006	89,36656189	13,8
2016-mar-13 06:22:28,388	0,090999998	4,203760147	34,5
2016-mar-13 06:41:09,846	0,098999999	4,176954746	34,5
2016-mar-13 14:13:07,193	95592	0	34,5
2016-mar-19 10:40:10,967	0,034000002	89,48597717	34,5
2016-mar-30 08:58:27,504	19945,26758	0	34,5
2016-abr-13 17:42:51,097	0,657000005	86,94670105	230
2016-abr-13 23:49:49,931	0,041999999	85,47705078	230
2016-abr-16 09:17:32,933	0,064000003	77,57997894	230
2016-abr-18 00:58:41,228	0,041999999	87,64585876	230
2016-abr-18 12:35:32,566	0,066	78,0213623	230
2016-abr-19 11:51:23,695	0,066	77,94087219	230
2016-abr-21 05:55:01,107	0,041000001	86,61312866	230
2016-abr-22 22:25:34,383	0,048999999	88,31783295	230

<b>Data/Hora</b>	<b>Duração (s)</b>	<b>Magnitude (% Nominal)</b>	<b>Medição (kV)</b>
2016-abr-23 11:08:33,193	0,057	75,1883316	230
2016-abr-25 02:13:14,570	0,100000001	83,42538452	230
2016-abr-26 02:40:16,602	0,075000003	81,69805145	230
2016-abr-26 20:33:18,218	0,048999999	82,52844238	230
2016-abr-27 20:57:43,263	0,083999999	86,73506927	230
2016-abr-28 21:44:54,996	0,041999999	86,84661102	230
2016-mai-03 04:18:27,236	0,086000003	85,75687408	230
2016-mai-07 01:44:52,812	0,041999999	84,48790741	230
2016-mai-09 22:43:23,902	0,041999999	86,42567444	230
2016-abr-23 11:08:33,206	0,041000001	88,68301392	34,5
2016-mai-14 19:43:39,998	0,077	88,93060303	230
2016-mai-15 10:09:47,290	0,048999999	87,47557068	230
2016-mai-18 18:55:26,392	0,090999998	84,62593842	230
2016-mai-18 19:50:12,840	0,082000002	85,16783905	230
2016-mai-23 20:18:11,715	0,092	85,15986633	230
2016-mai-30 20:22:22,674	0,082000002	85,49069977	230
2016-jun-04 00:32:21,585	0,074000001	82,43186951	230
2016-jun-05 22:27:40,873	0,074000001	81,31824493	230
2016-jun-09 03:26:01,948	0,043000001	87,24094391	230
2016-jun-09 04:31:00,045	0,066	23,36640739	230
2016-jun-09 19:40:52,292	0,082000002	82,95645142	230
2016-jun-10 04:06:05,930	0,085000001	87,85572815	230
2016-jun-10 19:35:35,770	0,082999997	82,41428375	230
2016-mai-23 10:28:55,437	0,284999996	87,01673889	13,8
2016-mai-23 10:28:55,717	27865,35547	0	34,5
2016-mai-23 18:15:37,040	4540,130859	0	34,5
2016-jun-01 10:24:31,024	251295	0	34,5
2016-jun-09 04:31:00,066	0,046999998	81,69010925	34,5
2016-jun-18 17:03:23,129	0,048999999	88,39938354	230
2016-jul-05 19:46:10,625	0,074000001	85,32775879	230
2016-jul-06 00:14:21,213	0,083999999	86,19792938	230
2016-jul-07 23:04:14,645	0,074000001	86,10115814	230
2016-jul-08 21:47:26,524	0,082000002	86,00855255	230
2016-jul-09 20:13:57,622	0,082000002	84,64373779	230
2016-jul-09 22:08:51,554	0,100000001	83,5016098	230
2016-jul-11 02:03:50,449	1,207000017	84,90090942	230
2016-jul-11 10:41:37,052	0,039000001	87,18493652	230

<b>Data/Hora</b>	<b>Duração (s)</b>	<b>Magnitude (% Nominal)</b>	<b>Medição (kV)</b>
2016-jul-11 11:59:58,504	0,067000002	49,88990021	230
2016-jul-11 15:15:25,628	0,182999998	75,27351379	230
2016-jul-11 18:44:39,488	0,083999999	82,35417938	230
2016-jul-11 19:22:52,325	0,066	89,40076447	230
2016-jul-12 01:12:12,397	0,083999999	83,44871521	230
2016-jul-14 01:57:23,541	0,081	85,63525391	230
2016-jul-14 18:23:12,635	0,075000003	84,51200104	230
2016-jul-14 21:22:41,886	0,032000002	86,87801361	230
2016-jul-16 17:06:04,107	0,090000004	84,63903809	230
2016-jul-16 17:06:09,647	0,082999997	84,92948151	230
2016-jul-17 22:42:56,219	0,030999999	86,73135376	230
2016-jul-11 11:59:58,505	0,057999998	88,72436523	34,5
2016-jul-11 15:15:25,636	0,075999998	87,56710815	34,5
2016-jul-25 19:55:38,972	0,092	80,82693481	230
2016-jul-26 11:33:58,273	0,057	86,52520752	230
2016-jul-26 11:34:07,794	0,068000004	86,57219696	230
2016-jul-26 12:09:19,135	0,016000001	89,20684052	230
2016-jul-26 20:17:53,855	0,074000001	88,66061401	230
2016-jul-28 01:31:45,399	0,072999999	89,70235443	230
2016-jul-28 20:14:35,723	0,090000004	84,73671722	230
2016-jul-30 05:16:54,798	0,050000001	84,64860535	230
2016-jul-30 05:19:59,056	0,082999997	84,75021362	230
2016-ago-03 06:06:28,500	0,082000002	80,79955292	230
2016-ago-03 21:12:00,232	0,079999998	86,00762177	230
2016-ago-04 21:41:49,271	0,082000002	85,43878174	230
2016-ago-06 01:21:39,128	0,093999997	82,44013977	230
2016-ago-07 19:54:06,608	0,082999997	79,87069702	230
2016-ago-08 05:47:51,182	0,086000003	87,18601227	230
2016-ago-15 06:23:42,916	0,066	17,93138313	230
2016-ago-24 08:39:12,068	32010,23633	0	230
2016-jul-24 11:39:07,114	133946	0	34,5
2016-jul-26 18:53:58,075	77673,04688	0	34,5
2016-ago-01 11:29:21,696	854499	0	34,5
2016-ago-12 11:09:32,060	36867,92188	0	34,5
2016-ago-15 06:23:42,926	0,048999999	81,43667603	34,5
2016-ago-24 23:01:56,951	0,083999999	84,23339844	230
2016-ago-31 22:25:07,633	0,092	83,21889496	230

<b>Data/Hora</b>	<b>Duração (s)</b>	<b>Magnitude (% Nominal)</b>	<b>Medição (kV)</b>
2016-set-03 05:35:52,816	0,072999999	89,01676941	230
2016-set-10 07:42:58,643	0,024	85,95121765	230
2016-set-10 10:03:06,097	0,066	77,56654358	230
2016-set-12 16:45:08,011	0,090999998	84,65415955	230
2016-set-12 20:40:15,685	0,023	89,06646729	230
2016-set-12 22:34:35,011	0,041999999	83,61613464	230
2016-set-12 22:34:35,969	0,034000002	86,08760071	230
2016-set-12 23:44:15,858	1,264999986	74,17060852	230
2016-set-13 03:28:11,251	0,067000002	88,55453491	230
2016-set-18 08:14:25,506	47496,84766	0	13,8
2016-out-17 07:36:21,978	0,083999999	61,04585648	230
2016-out-18 02:42:03,191	0,041000001	81,5533905	230
2016-out-18 02:57:43,092	0,056000002	75,45375824	230
2016-out-19 11:47:13,273	0,066	86,06095886	230
2016-out-24 20:51:01,052	0,041000001	84,71966553	230
2016-out-25 08:15:28,961	0,035	89,19205475	230
2016-out-02 07:09:40,452	0,068000004	89,21181488	13,8
2016-out-03 17:36:23,072	0,189999998	88,56082916	13,8
2016-out-04 00:20:19,894	0,933000028	5,175220966	13,8
2016-out-04 16:46:36,491	28012,52344	0	13,8
2016-out-05 00:39:58,934	914,9829712	0	13,8
2016-out-03 17:36:23,116	0,125	89,47509003	34,5
2016-out-03 17:36:23,963	17705,22852	0	34,5
2016-out-04 16:46:36,591	0,833999991	77,08334351	34,5
2016-out-18 02:57:43,118	0,023	89,28221893	34,5
2016-nov-01 17:56:04,692	0,067000002	76,2665329	230
2016-nov-01 23:09:09,211	0,041000001	83,24881744	230
2016-nov-01 23:09:23,710	0,041999999	83,33478546	230
2016-nov-01 23:41:19,458	0,041000001	83,50269318	230
2016-nov-02 00:15:09,875	0,033	89,14673615	230
2016-nov-02 00:18:08,703	0,035	87,61876678	230
2016-nov-11 03:00:11,990	0,044	83,35118866	230
2016-nov-11 03:00:17,406	0,041999999	83,89877319	230
2016-nov-16 00:52:56,628	0,048999999	80,98097992	230
2016-dez-10 19:41:02,678	0,082999997	51,16930008	13,8
2016-dez-10 19:41:41,742	0,083999999	49,36599731	13,8
2016-dez-13 15:04:46,224	0,090999998	86,34561157	13,8

<b>Data/Hora</b>	<b>Duração (s)</b>	<b>Magnitude (% Nominal)</b>	<b>Medição (kV)</b>
2016-dez-26 16:34:59,090	0,066	84,49330139	13,8
2016-dez-26 16:35:00,225	0,064999998	85,57235718	13,8
2016-dez-28 06:35:50,602	0,056000002	87,01338959	13,8
2016-dez-24 02:05:51,027	0,074000001	30,9475193	34,5
2016-dez-24 02:23:56,031	0,074000001	31,41794586	34,5
2016-dez-24 03:20:36,847	0,072999999	31,63111305	34,5
2016-dez-24 15:11:19,288	0,074000001	31,70425987	34,5
2016-dez-24 15:23:02,045	0,072999999	31,49421692	34,5
2016-dez-10 19:41:02,690	0,048999999	84,77500153	13,8
2016-dez-10 19:41:41,752	0,050999999	83,66072845	13,8
2016-dez-13 16:41:46,896	5742,745117	0	13,8
2017-jan-31 00:05:42,614	0,057999998	85,17150116	230
2017-fev-05 00:58:49,713	0,008	89,99084473	230
2017-fev-15 14:01:31,621	0,041000001	79,6149826	230
2017-fev-15 14:01:39,853	0,048999999	78,80609131	230
2017-fev-15 14:06:54,607	0,048999999	79,26963806	230
2017-fev-15 14:07:08,145	0,041000001	79,61771393	230
2017-fev-18 20:13:17,824	0,067000002	82,52529907	230
2017-fev-18 20:13:18,956	0,059	85,97277069	230
2017-fev-18 20:25:48,421	0,082999997	80,09357452	230
2017-fev-18 20:25:49,563	0,057999998	80,46392822	230
2017-fev-18 20:27:13,827	0,066	83,29777527	230
2017-fev-10 14:20:45,794	2955635	0	34,5
2017-mar-24 15:35:22,098	1349,401001	0	230
2017-mar-17 02:22:32,721	481484	0	34,5
2017-abr-26 00:16:14,977	0,086999997	16,83615685	230
2017-abr-26 01:04:58,440	13281,94434	0	230
2017-abr-26 00:16:14,997	0,075999998	84,71257019	34,5

Fonte: O autor, 2018.





Fonte: O autor, 2018.

B-Tabela 3: Estratificação e Quantificação Mensal de ambas Padronizações - Nível de 230 kV

Mês	NS	S	A	B	C	D	E	F	G	H	I	FI	S
1	10	0	8	0	0	1	0	0	0	0	0	0,105633803	0,260372406
2	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0,028169014	0,726058807
3	2	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,366261393
4	4	0	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0,056338028	0,425453949
5	7	0	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,401466036
6	12	2	7	4	0	0	2	0	0	0	0	0,464788732	0,533556453
7	5	0	4	0	1	0	0	0	0	0	0	0,049295775	0,394401489
8	9	0	6	2	1	0	0	0	0	0	0	0,105633803	0,354235952
9	12	1	8	1	0	2	0	0	1	0	0	0,288732394	0,41531206
10	2	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0,028169014	0,368242416
11	6	0	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0,056338028	0,379408691
12	16	0	12	4	0	0	0	0	0	0	0	0,112676056	0,353392458
13	9	0	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,281064504
14	7	1	7	0	0	0	1	0	0	0	0	0,176056338	0,460041718
15	25	1	23	0	1	1	0	0	1	0	0	0,204225352	0,318254013
16	8	1	7	1	0	0	1	0	0	0	0	0,204225352	0,469649332
17	7	1	6	1	0	0	0	0	1	0	0	0,077464789	0,305456608
18	6	0	4	2	0	0	0	0	0	0	0	0,056338028	0,406581052
19	7	0	5	1	0	0	0	0	0	0	0	0,028169014	0,322884216
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,296569977
22	6	0	3	2	0	0	0	0	0	0	0	0,056338028	0,336707331
23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0,176056338	1,663276863

Fonte: O autor, 2018.

## APÊNDICE C LISTA DOS AFUNDAMENTOS DE TENSÃO RELACIONADOS COM AS FALTAS ELÉTRICAS

C-Tabela 1: Lista dos Afundamentos de Tensão Relacionados com as Faltas Elétricas

<b>Data/Hora</b>	<b>Mag. (%)</b>	<b>Dur. (s)</b>	<b>Nível</b>	<b>Equ.</b>	<b>Causa da Falta</b>	<b>Tipo de Falta</b>	<b>D.F. (km)</b>
15/08/2015 10:31	70,0687	0,063	230	LT_16_12	DI	MONO	28,25
22/08/2015 23:10	76,0541	0,073	230	LT_16_12	DI	BI	63,25
18/09/2015 15:51	85,6716	0,041	230	LT_18_19	FE	MONO	410,82
21/09/2015 06:17	83,4085	0,076	230	LT_16_12	CN	MONO	83,25
02/10/2015 11:50	75,9334	0,082	230	LT_8_9	CN	MONO	83,2
14/10/2015 22:38	53,7264	0,066	230	LT_12_11	FE	MONO	18
14/10/2015 22:38	53,7264	0,066	230	B_11	FE	NI	42,9
14/10/2015 22:38	53,7264	0,066	230	LT_3_12	FE	MONO	26,5
14/10/2015 22:38	53,7264	0,066	230	LT_3_11	FE	NI	46
14/10/2015 22:38	53,7264	0,066	230	B_11	FE	NI	42,9
14/10/2015 22:38	38,5018	0,065	230	LT_12_11	FE	MONO	18
14/10/2015 22:38	38,5018	0,065	230	B_11	FE	NI	42,9
14/10/2015 22:38	38,5018	0,065	230	LT_3_12	FE	MONO	26,5
14/10/2015 22:38	38,5018	0,065	230	LT_3_11	FE	NI	46
14/10/2015 22:38	38,5018	0,065	230	B_11	FE	NI	42,9
14/10/2015 22:38	37,7979	0,124	230	LT_12_11	FE	MONO	18
14/10/2015 22:38	37,7979	0,124	230	B_11	FE	NI	42,9
14/10/2015 22:38	37,7979	0,124	230	LT_3_12	FE	MONO	26,5
14/10/2015 22:38	37,7979	0,124	230	LT_3_11	FE	NI	46
14/10/2015 22:38	37,7979	0,124	230	B_11	FE	NI	42,9
14/10/2015 22:51	86,637	0,046	34.5	LT_12_11	CN	MONO	54

<b>Data/Hora</b>	<b>Mag. (%)</b>	<b>Dur. (s)</b>	<b>Nível</b>	<b>Equ.</b>	<b>Causa da Falta</b>	<b>Tipo de Falta</b>	<b>D.F. (km)</b>
14/10/2015 22:51	88,508	0,058	34.5	B_11	CN	MONO	54
17/10/2015 01:35	85,7168	0,083	34.5	LT_3_12	DI	MONO	238,25
18/10/2015 06:25	82,4567	0,093	34.5	LT_3_11	DI	MONO	272,25
14/10/2015 22:38	87,7056	0,057	34.5	B_11	FE	MONO	18
14/10/2015 22:38	87,7056	0,057	34.5	LT_12_11	FE	NI	42,9
14/10/2015 22:38	87,7056	0,057	34.5	B_11	FE	MONO	26,5
14/10/2015 22:38	87,7056	0,057	34.5	LT_3_12	FE	NI	46
14/10/2015 22:38	87,7056	0,057	34.5	LT_3_11	FE	NI	42,9
14/10/2015 22:38	81,755	0,09	34.5	B_11	FE	MONO	18
14/10/2015 22:38	81,755	0,09	230	LT_5_8	FE	NI	42,9
14/10/2015 22:38	81,755	0,09	230	LT_5_8	FE	MONO	26,5
14/10/2015 22:38	81,755	0,09	230	LT_17_16	FE	NI	46
14/10/2015 22:38	81,755	0,09	230	LT_17_16	FE	NI	42,9
18/11/2015 04:38	89,4677	0,032	230	LT_17_15	AVO	MONO	284,11
18/11/2015 08:06	89,743	0,025	230	LT_17_15	AVO	MONO	284,11
21/11/2015 23:36	83,8123	0,083	230	LT_17_16	DI	MONO	232,25
24/11/2015 00:52	53,7293	0,073	230	LT_16_12	DI	MONO	49,25
24/11/2015 00:52	89,1454	0,04	13.8	LT_16_12	DI	MONO	49,25
24/11/2015 00:52	88,7263	0,041	34.5	LT_16_12	DI	MONO	49,25
18/12/2015 14:25	83,9319	0,066	230	LT_3_4	CN	MONO	44,5
30/12/2015 00:37	89,9663	0,022	230	LT_17_15	DI	MONO	270,11
08/01/2016 08:48	72,289	0,712	230	LT_17_18	FE	MONO	309,7
08/01/2016 08:48	72,289	0,712	230	LT_17_16	FE	BI	185,75
08/01/2016 08:48	72,289	0,712	230	LT_17_15	FE	MONO	331,485
08/01/2016 08:48	72,289	0,712	230	LT_17_14	FE	MONO	278,25
08/01/2016 08:48	72,289	0,712	230	B_17	FE	NI	284,25
08/01/2016 08:48	72,289	0,712	230	B_17	FE	NI	284,25
08/01/2016 08:48	78,9524	0,684	13.8	LT_17_18	FE	MONO	309,7
08/01/2016 08:48	78,9524	0,684	13.8	LT_17_16	FE	BI	185,75
08/01/2016 08:48	78,9524	0,684	13.8	LT_17_15	FE	MONO	331,485
08/01/2016 08:48	78,9524	0,684	13.8	LT_17_14	FE	MONO	278,25
08/01/2016 08:48	78,9524	0,684	13.8	B_17	FE	NI	284,25
08/01/2016 08:48	78,9524	0,684	13.8	B_17	FE	NI	284,25
11/01/2016 09:40	76,0595	0,077	34.5	LT_17_18	DI	MONO	131,25
23/01/2016 06:03	84,1472	0,066	34.5	LT_17_16	DI	MONO	182,25

<b>Data/Hora</b>	<b>Mag. (%)</b>	<b>Dur. (s)</b>	<b>Nível</b>	<b>Equ.</b>	<b>Causa da Falta</b>	<b>Tipo de Falta</b>	<b>D.F. (km)</b>
25/01/2016 09:03	76,0391	0,15	34.5	LT_17_15	AVO	MONO	145,25
25/01/2016 12:27	74,7867	0,117	34.5	LT_17_14	AVO	MONO	137,25
08/01/2016 08:48	86,1756	0,518	34.5	B_17	FE	MONO	309,7
08/01/2016 08:48	86,1756	0,518	34.5	B_17	FE	BI	185,75
08/01/2016 08:48	86,1756	0,518	230	LT_17_18	FE	MONO	331,485
08/01/2016 08:48	86,1756	0,518	230	LT_17_16	FE	MONO	278,25
08/01/2016 08:48	86,1756	0,518	230	LT_17_15	FE	NI	284,25
08/01/2016 08:48	86,1756	0,518	230	LT_17_14	FE	NI	284,25
08/01/2016 08:48	86,122	0,476	230	B_17	FE	MONO	309,7
08/01/2016 08:48	86,122	0,476	230	B_17	FE	BI	185,75
08/01/2016 08:48	86,122	0,476	34.5	LT_17_18	FE	MONO	331,485
08/01/2016 08:48	86,122	0,476	34.5	LT_17_16	FE	MONO	278,25
08/01/2016 08:48	86,122	0,476	34.5	LT_17_15	FE	NI	284,25
08/01/2016 08:48	86,122	0,476	34.5	LT_17_14	FE	NI	284,25
08/01/2016 08:48	88,701	0,558	34.5	B_17	FE	MONO	309,7
08/01/2016 08:48	88,701	0,558	34.5	B_17	FE	BI	185,75
08/01/2016 08:48	88,701	0,558	230	LT_17_16	FE	MONO	331,485
08/01/2016 08:48	88,701	0,558	230	LT_17_16	FE	MONO	278,25
08/01/2016 08:48	88,701	0,558	230	LT_17_16	FE	NI	284,25
08/01/2016 08:48	88,701	0,558	230	LT_17_16	FE		284,25
21/03/2016 20:03	85,2185	0,041	230	LT_13_14	CN	MONO	208,25
30/03/2016 05:17	86,1881	0,083	230	LT_17_16	DI	MONO	233,25
02/04/2016 21:42	86,1154	0,041	230	LT_17_14	CN	MONO	219,75
07/04/2016 06:09	85,7859	0,041	230	LT_17_18	DI	MONO	297,25
13/04/2016 23:49	85,4771	0,042	230	LT_17_18	DI	MONO	291,25
16/04/2016 09:17	77,58	0,064	230	LT_17_16	DI	MONO	130,25
18/04/2016 00:58	87,6459	0,042	230	LT_3_2	DI	MONO	48,5
18/04/2016 12:35	78,0214	0,066	230	LT_17_16	DI	MONO	203,25
19/04/2016 11:51	77,9409	0,066	230	LT_17_16	DI	MONO	131,25
21/04/2016 05:55	86,6131	0,041	230	LT_1_2	DI	MONO	65,6
25/04/2016 02:13	83,4254	0,1	230	LT_17_16	CN	MONO	270,25
26/04/2016 02:40	81,6981	0,075	230	LT_17_16	CN	MONO	158,25
27/04/2016 20:57	86,7351	0,084	230	LT_17_15	DI	MONO	390,11
28/04/2016 21:44	86,8466	0,042	230	LT_17_18	DI	MONO	293,25

<b>Data/Hora</b>	<b>Mag. (%)</b>	<b>Dur. (s)</b>	<b>Nível</b>	<b>Equ.</b>	<b>Causa da Falta</b>	<b>Tipo de Falta</b>	<b>D.F. (km)</b>
03/05/2016 04:18	85,7569	0,086	230	LT_17_16	DI	MONO	237,25
09/05/2016 22:43	86,4257	0,042	230	LT_13_14	DI	MONO	178,25
14/05/2016 19:43	88,9306	0,077	230	LT_17_15	AVO	MONO	392,11
15/05/2016 10:09	87,4756	0,049	230	LT_3_10	CN	MONO	42,5
15/05/2016 10:09	87,4756	0,049	230	LT_3_5	FE	MONO	44,75
18/05/2016 18:55	84,6259	0,091	230	LT_17_16	AVO	MONO	249,25
18/05/2016 19:50	85,1678	0,082	230	LT_17_16	AVO	MONO	246,25
23/05/2016 20:18	85,1599	0,092	230	LT_17_16	AVO	MONO	246,25
23/05/2016 20:18	85,1599	0,092	230	LT_17_16	FE	NI	246,25
30/05/2016 20:22	85,4907	0,082	230	LT_17_16	AVO	MONO	249,25
04/06/2016 00:32	82,4319	0,074	230	LT_17_16	DI	MONO	209,25
05/06/2016 22:27	81,3182	0,074	230	LT_17_16	DI	MONO	162,25
09/06/2016 04:31	23,3664	0,066	230	LT_16_12	DI	MONO	2,25
09/06/2016 19:40	82,9565	0,082	34.5	LT_16_12	AVO	MONO	256,25
10/06/2016 04:06	87,8557	0,085	230	LT_17_16	AVO	MONO	389,11
10/06/2016 19:35	82,4143	0,083	230	LT_17_15	DI	MONO	230,25
09/06/2016 04:31	81,6901	0,047	230	LT_17_16	DI	MONO	2,25
05/07/2016 19:46	85,3278	0,074	230	LT_17_16	CN	MONO	209,25
06/07/2016 00:14	86,1979	0,084	230	LT_17_16	CN	MONO	237,25
07/07/2016 23:04	86,1012	0,074	230	LT_17_16	AVO	MONO	237,25
08/07/2016 21:47	86,0086	0,082	230	LT_17_16	AVO	MONO	238,25
09/07/2016 22:08	83,5016	0,1	230	LT_17_16	CN	MONO	250,25
11/07/2016 10:41	87,1849	0,039	230	LT_17_14	CN	BI	242,75
11/07/2016 15:15	75,2735	0,183	230	LT_17_16	CN	BI	276,25
11/07/2016 18:44	82,3542	0,084	34.5	LT_17_16	CN	MONO	241,25
11/07/2016 19:22	89,4008	0,066	230	LT_17_16	CN	MONO	368,11
12/07/2016 01:12	83,4487	0,084	230	LT_17_15	CN	MONO	245,25
14/07/2016 01:57	85,6353	0,081	230	LT_17_16	CN	MONO	239,25
14/07/2016 18:23	84,512	0,075	230	LT_17_16	AVO	MONO	214,25
16/07/2016 17:06	84,639	0,09	230	LT_17_16	AVO	MONO	243,25
16/07/2016 17:06	84,9295	0,083	230	LT_17_16	AVO	MONO	243,25
11/07/2016 15:15	87,5671	0,076	230	LT_17_16	CN	BI	276,25
25/07/2016 19:55	80,8269	0,092	230	LT_17_16	CN	MONO	222,25
26/07/2016 20:17	88,6606	0,074	230	LT_17_15	AVO	MONO	388,11
28/07/2016 01:31	89,7024	0,073	230	LT_17_15	AVO	MONO	392,11

<b>Data/Hora</b>	<b>Mag. (%)</b>	<b>Dur. (s)</b>	<b>Nível</b>	<b>Equ.</b>	<b>Causa da Falta</b>	<b>Tipo de Falta</b>	<b>D.F. (km)</b>
28/07/2016 20:14	84,7367	0,09	230	LT_17_16	AVO	MONO	251,25
30/07/2016 05:16	84,6486	0,05	230	LT_17_18	CN	MONO	292,25
03/08/2016 06:06	80,7996	0,082	230	LT_17_16	CN	MONO	210,25
03/08/2016 21:12	86,0076	0,08	230	LT_17_15	AVO	MONO	391,11
04/08/2016 21:41	85,4388	0,082	230	LT_17_15	AVO	MONO	392,11
07/08/2016 19:54	79,8707	0,083	230	LT_17_16	CN	MONO	184,25
08/08/2016 05:47	87,186	0,086	230	LT_17_15	AVO	MONO	390,11
15/08/2016 06:23	17,9314	0,066	230	LT_16_12	AVO	MONO	7,25
15/08/2016 06:23	81,4367	0,049	34.5	LT_16_12	AVO	MONO	7,25
24/08/2016 23:01	84,2334	0,084	230	LT_17_16	CN	MONO	240,25
31/08/2016 22:25	83,2189	0,092	230	LT_17_16	CN	MONO	251,25
17/10/2016 07:36	61,0459	0,084	230	LT_13_12	CN	MONO	64,25
01/11/2016 17:56	76,2665	0,067	230	LT_5_7	CN	MONO	80
13/12/2016 15:04	86,3456	0,091	13.8	LT_3_4	AVO	MONO	53,5
26/12/2016 16:35	85,5724	0,065	13.8	LT_16_12	DI	MONO	69,25

Fonte: O autor, 2018.

## APÊNDICE D RESULTADOS DOS AGRUPAMENTOS DOS AFUNDAMENTOS DE TENSÃO E FALTAS ELÉTRICAS

D- Tabela 1: Agrupamento para a Magnitude

<b>N</b>	<b>Porc. (%)</b>	<b>Nível de Medição (kV)</b>	<b>Equipamento</b>	<b>Causa da Falta</b>	<b>Tipo de Falta</b>	<b>Magnitude Categórica</b>
1	18,57%	230	LT_3_10	CN	MONO	M3
2	17,86%	230	LT_16_12	CN	MONO	M3
3	15,00%	230	LT_17_16	DI	MONO	M3
4	14,29%	230	LT_17_16	AVO	MONO	M3
5	11,43%	13,8	LT_16_12	FE	BI	M3
6	7,86%	230	LT_17_16	FE	BI	M3
7	7,14%	230	LT_17_15	DI	MONO	M3
8	6,43%	13,8	LT_16_12	FE	MONO	M3
9	1,43%	230	LT_17_16	DI	BI	M2
10	1,43%	230	B_17	CN	MONO	M3

Fonte: O autor, 2018.

D- Tabela 2: Agrupamento para Duração

<b>N</b>	<b>Porc. (%)</b>	<b>Nível de Medição (kV)</b>	<b>Equipamento</b>	<b>Causa da Falta</b>	<b>Tipo de Falta</b>	<b>Duração Categórica</b>
1	22,86%	230	LT_3_10	CN	MONO	D1
2	20,71%	230	LT_17_16	CN	MONO	D1
3	14,29%	230	LT_16_12	DI	MONO	D1
4	14,29%	230	LT_17_16	AVO	MONO	D1
5	10,71%	13,8	LT_17_15	FE	MONO	D2
6	7,14%	230	LT_17_16	DI	MONO	D1
7	6,43%	230	B_17	FE	BI	D3
8	2,14%	13,8	LT_17_16	FE	BI	D3
9	1,43%	230	LT_16_12	DI	BI	D1
10	1,43%	230	LT_16_12	CN	MONO	D1

Fonte: O autor, 2018.

D- Tabela 3: Agrupamento para Classe de Sensibilidade

<b>N</b>	<b>Porc. (%)</b>	<b>Nível de Medição (kV)</b>	<b>Equipamento</b>	<b>Causa da Falta</b>	<b>Tipo de Falta</b>	<b>Classe de Sensibilidade</b>
1	15,00%	230	B_17	FE	BI	G
2	13,57%	230	LT_17_16	AVO	MONO	A
3	15,71%	230	LT_16_12	CN	MONO	A
4	7,14%	13,8	LT_17_15	FE	MONO	A
5	1,43%	13,8	LT_17_16	FE	BI	A
6	8,57%	230	LT_16_12	DI	BI	B
7	6,43%	230	LT_17_16	DI	MONO	A
8	3,57%	230	LT_17_16	CN	MONO	A
9	13,57%	230	LT_16_12	DI	MONO	C
10	15,71%	230	LT_3_10	CN	MONO	A

Fonte: O autor, 2018.

D- Tabela 4: Agrupamento para a Severidade

N	Porc. (%)	Nível de Medição (kV)	Equipamento	Causa da Falta	Tipo de Falta	Severidade
1	1,43%	230	LT_16_12	DI	BI	NS
2	1,43%	230	LT_16_12	CN	MONO	NS
3	7,14%	230	LT_17_16	DI	MONO	NS
4	7,86%	13,8	LT_17_15	FE	MONO	NS
5	9,29%	13,8	LT_17_16	FE	BI	NS
6	12,86%	230	LT_3_10	CN	MONO	NS
7	14,29%	230	LT_17_16	AVO	MONO	NS
8	15,00%	230	LT_16_12	DI	MONO	NS
9	15,00%	230	B_17	FE	BI	S
10	17,14%	230	LT_17_16	CN	MONO	NS

Fonte: O autor, 2018.

D- Tabela 5: Agrupamento para Magnitude - Caso Geral

N	Porc. (%)	Nível de Medição (kV)	Distância Categórica	Proximidade com a Geração	Causa da Falta	Tipo de Falta	Magnitude Categórica
1	32,86%	230	T2	G	CN	MONO	M3
2	13,57%	230	T2	G	AVO	MONO	M3
3	20,00%	230	T1	G	CN	MONO	M3
4	10,00%	230	T0	NG	DI	MONO	M3
5	7,86%	13,8	T2	G	FE	MONO	M3
6	4,29%	13,8	T2	G	FE	BI	M3
7	4,29%	34,5	T0	NG	DI	MONO	M3
8	3,57%	230	T0	NG	CN	MONO	M3
9	2,14%	230	T2	G	FE	BI	M3
10	1,43%	230	T0	NG	DI	BI	M2

Fonte: O autor, 2018.

D- Tabela 6: Agrupamento para Duração - Caso Geral

N	Porc. (%)	Nível de Medição (kV)	Distância Categórica	Proximidade com a Geração	Causa da Falta	Tipo de Falta	Duração Categórica
1	30,71%	230	T2	G	CN	MONO	D1
2	14,29%	230	T0	NG	DI	MONO	D1
3	14,29%	230	T2	G	AVO	MONO	D1
4	13,57%	230	T1	G	CN	MONO	D1
5	11,43%	13,8	T2	G	FE	MONO	D2
6	6,43%	230	T2	G	FE	BI	D3
7	3,57%	230	T0	NG	CN	MONO	D1
8	2,86%	230	T0	NG	DI	MONO	D1
9	2,14%	13,8	T2	G	FE	BI	D3
10	1,43%	230	T0	NG	DI	BI	D1

Fonte: O autor, 2018.

D- Tabela 7: Agrupamento para Classes de Sensibilidade - Caso Geral

N	Porc. (%)	Nível de Medição (kV)	Distância Categórica	Proximidade com a Geração	Causa da Falta	Tipo de Falta	Classe de Sensibilidade
1	27,86%	230	T2	G	CN	MONO	A
2	21,43%	230	T1	G	CN	MONO	A
3	13,57%	230	T2	G	AVO	MONO	A
4	9,29%	230	T0	NG	DI	MONO	C
5	7,86%	13,8	T2	G	FE	MONO	A
6	6,43%	230	T2	G	FE	BI	G
7	5,71%	230	T0	NG	DI	MONO	A
8	4,29%	13,8	T2	G	FE	BI	A
9	2,14%	230	T0	NG	CN	MONO	A
10	1,43%	230	T0	NG	DI	BI	B

Fonte: O autor, 2018.

D- Tabela 8: Agrupamento para Severidade - Caso Geral

<b>N</b>	<b>Porc. (%)</b>	<b>Nível de Medição (kV)</b>	<b>Distância Categórica</b>	<b>Proximidade com a Geração</b>	<b>Causa da Falta</b>	<b>Tipo de Falta</b>	<b>Severidade</b>
1	32,86%	230	T2	G	CN	MONO	NS
2	17,86%	230	T1	G	CN	MONO	NS
3	13,57%	230	T2	G	AVO	MONO	NS
4	10,71%	230	T0	NG	DI	MONO	NS
5	7,86%	13,8	T2	G	FE	MONO	NS
6	5,71%	13,8	T2	G	FE	BI	NS
7	4,29%	34,5	T0	NG	DI	MONO	NS
8	3,57%	230	T0	NG	CN	MONO	NS
9	2,86%	230	T2	G	FE	BI	S
10	1,43%	230	T0	NG	DI	BI	NS

Fonte: O autor, 2018.

## ANEXO A DADOS DO SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA

A- Tabela 1: Dados de Geração do SEP

Número Atribuído	Geração (MW)	Nível de Tensão (kV)
1	500	230
10	248	230
17	796	230
20	463	230
21	412,8	230

Fonte: (ONS, 2018).

A- Tabela 2: Dados das linhas de transmissão do SEP

Barra Início	Barra Fim	Nível de Tensão (kV)	$R_1$ (pu)	$X_1$ (pu)	$R_0$ (pu)	$X_0$ (pu)
1	2	230	0,4	2,09	1,61	6,15
1	4	230	0,208	1,033	0,676	2,672
1	20	230	0,39	2,2	1,62	6,25
2	3	230	0,4	2,09	1,61	6,15
2	13	230	2,52	12,6	11,34	30,24
3	10	230	0,11	0,63	0,54	1,77
3	11	230	0,28	1,35	1,01	4,25
3	5	230	0,19	1,15	0,99	3,26
3	26	230	0,26	1,29	0,86	2,68
3	12	230	0,739	3,689	2,8	10,59
5	8	230	0,53	2,68	2,08	8,24
5	6	230	0,328	1,542	1,04	4,26
5	10	230	0,19	1,13	0,98	3,21
5	21	230	0,35	1,85	1,62	5,24
5	7	230	0,04	0,31	0,22	0,74
6	23	230	0,02	0,156	0,15	0,051
7	22	230	0,04	0,83	0,63	1,93
8	9	230	0,18	0,86	0,6	2,74
8	25	230	0,13	0,9	0,64	2,17
9	24	230	0,24	1,15	0,75	3,08
11	12	230	0,753	3,71	2,26	11,13
12	13	230	1,79	8,95	8,05	21,48
12	16	230	1,72	8,57	6,67	24,68
12	15	230	0,37	1,85	1,66	4,44
13	14	230	2,38	11,9	10,71	28,56
13	28	230	2,99	14,95	13,45	35,88
14	15	230	0,84	4,18	3,18	11,95
14	17	230	1,37	11,61	9,92	37,91
15	12	230	0,37	1,85	1,66	4,44
15	17	230	2,92	14,59	13,62	37,37
15	28	230	0,84	4,18	3,18	11,95
16	17	230	3,74	18,73	12,76	37,05
17	18	230	0,87	4,81	4,43	12,4
17	27	230	0,1	0,5	0,45	1,2
18	19	230	1,89	14,44	5,67	43,62
19	29	230	2,45	12,24	7,35	36,72

Fonte: (ONS, 2018).